FORMACION DE SUPERCONTINENTES • ORION • EL CRISTALINO

INVESTIGACION y CIENCIA

DICIEMBRE 2004
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

UN UNIVERSO DE DISCOS

LA INTERNET DE LAS COSAS

EMMY NOETHER

EL CONTROL DE LOS HURACANES

LOS INTRONES

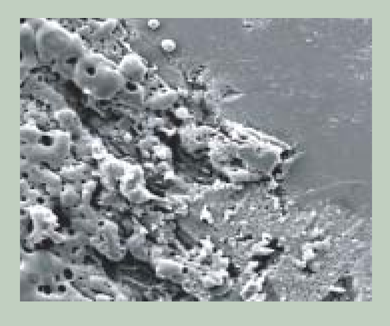




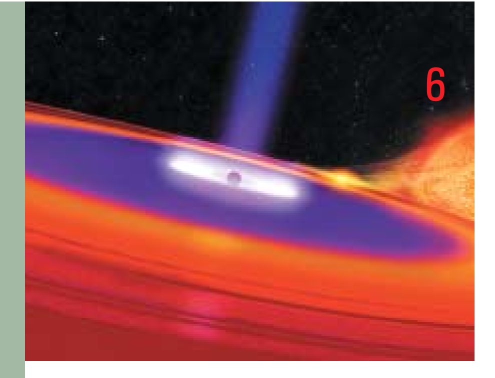
Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Diciembre de 2004

Número 339













DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

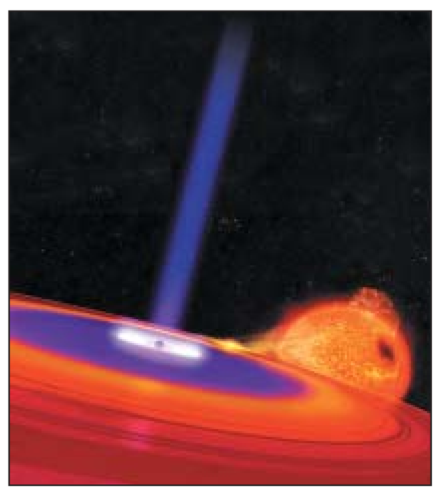
Madrid:
GM Exclusivas Publicidad
Menorca, 8, Bajo, Centro Izda.
28009 Madrid
Tel. y Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Un universo de discos*; Sònia Ambrós: *La formación de los supercontinentes*; Felipe Cortés: *Los intrones*; Manuel Puigcerver: *El control de los huracanes*; Luis Bou: *La Internet de las cosas*; Esteban Santiago: *El cristalino*; Emilio Elizalde: *Emmy Noether*; J. Vilardell: *Hace...*, y *Apuntes*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*; Jürgen Goicoechea: *Ideas aplicadas*



Portada: Don Dixon

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

KWASHIORKOR. «En 1929, una doctora inglesa que trabajaba entre las tribus de la Costa de Oro, en Africa Occidental, dio con una enigmática enfermedad. Parecía ésta atacar sólo a niños de corta edad y solía resultar letal. El doctor Cicely Williams creyó que la causa se hallaba en la malnutrición; le dio el nombre de kwashiorkor, tal como la llamaba la tribu Ga. En 1944 se descubrió que el kwashiorkor respondía a una deficiencia proteínica. En las zonas templadas del planeta, donde se concentran la mayor parte de los hospitales y de la investigación biológica, la malnutrición se suele relacionar con deficiencias vitamínicas más que proteínicas. Ello resulta comprensible, pues en las zonas templadas el alimento básico es el cereal, producto rico en proteínas pero pobre en ciertas vitaminas. Una serie de investigaciones y debates, en su mayoría por iniciativa de la Organización Mundial de la Salud y la Organización de Alimentación y Agricultura, muestran que el kwashiorkor se manifiesta probablemente en todos los países tropicales, donde la dieta se basa en cultivos pobres en proteínas (sobre todo frutas y verduras).»

...cien años

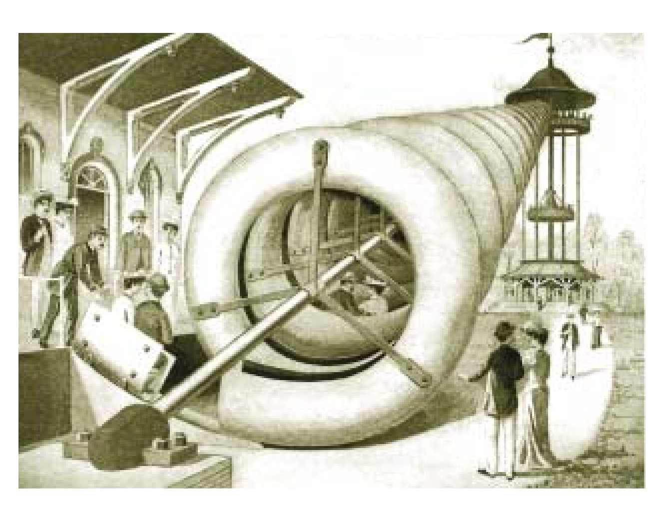
PLANTAS MEDICINALES. «EE.UU. cultiva un buen número de sus plantas medicinales, pero son tan adictos a los fármacos que cada año pagan a otros países una cuenta de importaciones de quince millones de dólares. Los primitivos pioneros de este país consideraban el cultivo de hierbas medicinales de suma importancia; pero, al desarrollarse la medicina, y en especial con la expansión de las ubicuas farmacias, aquella práctica cayó en desuso. Las plantas medicinales podían conseguirse con mayor facilidad, y por un módico precio, en las apotecas. Hoy en día, la mayor parte de las plantas medicinales comunes que crecen en el campo se desprecian. En algunos casos, los agricultores destruyen esas plantas silvestres como si se tratara de malas hierbas. Entre esas desdeñadas plantas oficinales se cuentan el diente de león, la grama del norte y la romaza.»

CALÍGULA. «El lago Nemi, que se halla en los montes Albanos, al sur de Roma, es una pequeña y hermosa extensión de agua que llena la cuenca formada por un cráter extinto. Reza una tradición local que en el lago se hundió una gran embarcación perteneciente a un emperador romano. En la presente investigación, a cargo de los señores Borghi y Vittorio Malfatti, se emplearon buzos expertos para explorar el fondo. Se hallaron dos grandes naves, ambas casi hundidas en la arena. La mayor de ellas mide unos 70 metros de largo y 24 de ancho. Por su gran tamaño, mayor que el de las galeras de guerra, y su excepcional anchura, fueron sin duda utilizadas por uno de los emperadores, tal vez Calígula, como barcazas de recreo.» [*Nota de la redacción: Los cascos se recuperaron cuando el lago se drenó en 1924, pero el fuego los destruyó en 1944.*]

UNA ATRACCIÓN DE FERIA. «Un ingenioso inventor ha recuperado el antiguo principio del tornillo de Arquímedes [*véase la ilustración*] y transformado en artefacto de diversión para parques de atracciones, ferias y lugares similares. Un eje central soporta una conducción espiral. Por dentro de ésta viajan carros sobre raíles; cada uno transporta dos o tres personas. Los pasajeros experimentan la insólita sensación de ver girar rápidamente en su torno un túnel espiral, mientras avanzan lentamente y en línea recta hacia la cima de la torre. El artefacto ofrece gran diversión.»

...ciento cincuenta años

FÍLTRESE EL AGUA. «Los vecinos de Boston han estado sufriendo durante algún tiempo un agua de sabor ofensivo. El presidente de la Comisión de Aguas —Thos. Wetmore— declara que, hasta donde ha llegado la investigación, las impurezas del agua son por completo de origen vegetal. Dicho comunicado, suponemos, pretende calmar toda aprehensión acerca de la contaminación del agua por el vertido de sustancias animales. Según la Comisión de Aguas, las lluvias habidas en septiembre y octubre arrastraron hacia el lago numerosas impurezas vegetales, pero podría resultar que el desagradable sabor del agua lo hayan causado minúsculos animálculos, algunos de los cuales, al morir, contaminan fuertemente el agua. Es nuestra opinión que todas las aguas de lagos y ríos que se empleen para abastecer ciudades debe filtrarse. Ello puede hacerse, sin grandes gastos, haciéndola pasar a través de lechos filtrantes de grava, arena y arcilla.»



El tornillo de Arquímedes transformado en atracción de feria, 1904.

APUNTES

COMPORTAMIENTO

Carroñeros de las profundidades

Cuando una ballena muere, los carroñeros de las profundidades devoran la carne del cadáver. Sin embargo, estudiando los huesos de una ballena en la bahía de Monterrey, en California, se han descubierto dos especies de un nuevo género de anélidos, *Osedax*, que se alimentan de los esqueletos. Las hembras de estos gusanos tubulares, tocadas con una cresta en forma de plumas rojas, hinchadas con huevos, hunden unas raíces verdes en el hueso. Parece que en esas raíces viven simbióticamente unas bacterias que, al digerir los ricos depósitos aceitosos de los huesos, mantienen a la hembra. Docenas de machos microscópicos de gusano, portadores de esperma, moran en el tubo de la hembra, alrededor del oviducto. Los descubridores de estos seres los comparan a los dientes de león: diseminan su descendencia para que las corrientes oceánicas las lleven hasta una ballena recién muerta. —*J.R. Minkel*



Una nueva especie de gusano tubular, *Osedax frankpressi*, devora los huesos de las ballenas muertas.

INSTITUTO DE INVESTIGACION DEL ACUARIO DE MONTERREY, 2003

FISICA

Una ley que apenas lo es

Justo antes de recibir el premio Nobel de Física de este año, Frank Wilczek reflexionaba en *Physics Today* sobre el principio de la física que más quebraderos le dio durante sus días de estudiante. No se trata de una compleja ecuación, sino de la más sencilla de las igualdades físicas: $F = ma$. Los filósofos de la ciencia acostumbran considerarla un mero esquema, una plantilla o principio-guía. A Wilczek, de mentalidad matemática, le despistaba, cuenta, esa laxitud. Para él, una ley tenía que ser un algoritmo; la segunda ley de Newton, en cambio, se parecía más al lenguaje ordinario. La noción de fuerza no desempeña ningún papel ni en la mecánica cuántica, ni en las teorías de campos, clásicas o cuánticas, como la relatividad general y el modelo estándar. La propia mecánica clásica puede formularse, mediante la noción de lagrangiano, sin que la fuerza desempeñe un papel primario. Wilczek explica por qué seguimos recurriendo, sin embargo, a la noción de fuerza: viene a ser como un lenguaje de alto nivel en informática, que encierra en sí toda la inasequible complejidad del lenguaje que entiende la máquina, o la naturaleza; la simplificación es posible porque la materia, en circunstancias ordinarias, permanece en un estado estable y sólo varían unos pocos de sus grados de libertad. Por otra parte, la fuerza tiene la ventaja psicológica de que extrapola lo que experimentamos en nuestros músculos. En buena medida, concluye, si seguimos hablando de ella es por la inercia... intelectual.

ENDOCRINOLOGIA

Como si estuviese embarazado

Muchos factores —sociales, hormonales— pueden hacer que un hombre que va a ser padre experimente algunos de los efectos secundarios de un embarazo: náuseas, aumento de peso, cambios del estado de ánimo, hinchazón. En las poblaciones occidentales modernas, las estimaciones de la prevalencia de este síndrome van del 20 al 80 por ciento. Se han enunciado diversas hipótesis. Para empezar, el cambio en la forma de vida de uno de los miembros de una pareja puede afectar al otro: los antojos y apetito crecido de la embarazada pueden llevar al hombre a ganar peso, al ardor del estómago y a la indigestión. Los sentimientos de la madre oscilan a veces entre la frustración de sentirse impedida a una desbordante alegría; quizás induzcan en el padre celos por no poder traer al mundo un hijo, una sensación de culpa por haber causado esa transformación, no siempre bienvenida, en su compañera o un egoísta querer atraer la atención hacia sí. También puede que contribuyan las alteraciones de la actividad sexual y la vida social.



Estudios recientes nos han enseñado que algunas de las hormonas que fluctúan en las embarazadas quizá se alteren también en los futuros padres. Los hombres con niveles altos de prolactina, que causa la lactación en las mujeres, informan de más síntomas secundarios del embarazo. Su prolactina paterna llega a un máximo justo antes del parto. Los niveles de cortisona (hormona esteroidea segregada como reacción al estrés) y los esteroides sexuales estradiol y testosterona cambian también en el padre, aunque no de manera tan señalada como en la madre. Pero no sabemos si estos cambios hormonales son la causa de los comportamientos observados o sólo coinciden con ellos. Tienta creer lo primero, pero los factores sociales y emocionales pueden influir otro tanto.—*Katherine E. Wynne-Edwards*

SARA CHEN

BIOQUIMICA

Enzimas de función variable

Las enzimas pueden ejercer varias funciones, cambiando al instante de una a otra según la posición que ocupen dentro de la célula. Se ha estudiado este fenómeno en las desaturasas de *Arabidopsis*. Desaturan los lípidos eliminando átomos de hidrógeno de las cadenas de ácidos grasos para crear enlaces moleculares. Las células vegetales pueden marcar las desaturasas para que pasen a los citoplastos, donde tiene lugar la fotosíntesis. Sin las marcas, entraban en el retículo endoplasmático, donde establecían enlaces en distintos lugares a lo largo de la cadena lipídica. Alrededor de un cuatro por ciento de las familias proteínicas de la *Arabidopsis* presentan variaciones en las marcas; cuantía considerable, que da a entender que las enzimas multifuncionales podrían ayudar a los organismos en su adaptación a los cambios del entorno. Quizá quepa aprovechar este fenómeno para obtener cultivos con grasas menos saturadas, que son más saludables.

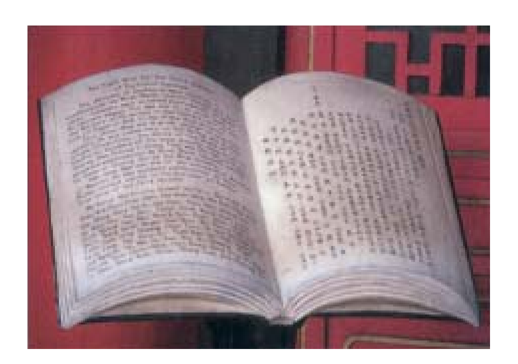
—Charles Choi

CESAR LLAVE; FUENTE: JAMES C. CARRINGTON, UNIVERSIDAD DEL ESTADO DE OREGON, EE.UU.

NEUROLOGIA

Dislexia cultural

Los niños que aprenden lenguajes alfabéticos y son disléxicos encuentran dificultades a la hora de asociar las letras de una palabra con su sonido respectivo. Los escolares chinos han de habérselas ante otro reto: su cerebro debe conectar la sutil disposición de los trazos de cada carácter con su sonido y su significado, una tarea mucho más visual y espacial. Li Hai Tan, de la Universidad de Hong Kong, acaba de descubrir que en el problema que atenaza a los escolares disléxicos se encuentra implicada una zona cerebral distinta de la que interviene en el aprendizaje del alfabeto. Se venía suponiendo que la lectura incorrecta de un texto se hallaba vinculada a una deficiente actividad de la región temporoparietal izquierda. Allí el cerebro convierte los "grafemas" (símbolos escritos) en "fonemas" (sonidos del habla). Se suponía también un origen biológico universal de la dislexia para todo tipo de escolares. Sin embargo, nunca se sometió a prueba entre los niños chinos. Tan se sirvió de la técnica de formación de imágenes conocida por resonancia magnética funcional. Y comprobó que los pequeños disléxicos de su país mostraban, comparados con los normales, una menor actividad en su giro medio frontal izquierdo, pero no discrepaban en punto a excitación de la zona temporoparietal izquierda.



PALEOANTROPOLOGIA

Un homínido en los días del *Homo sapiens*

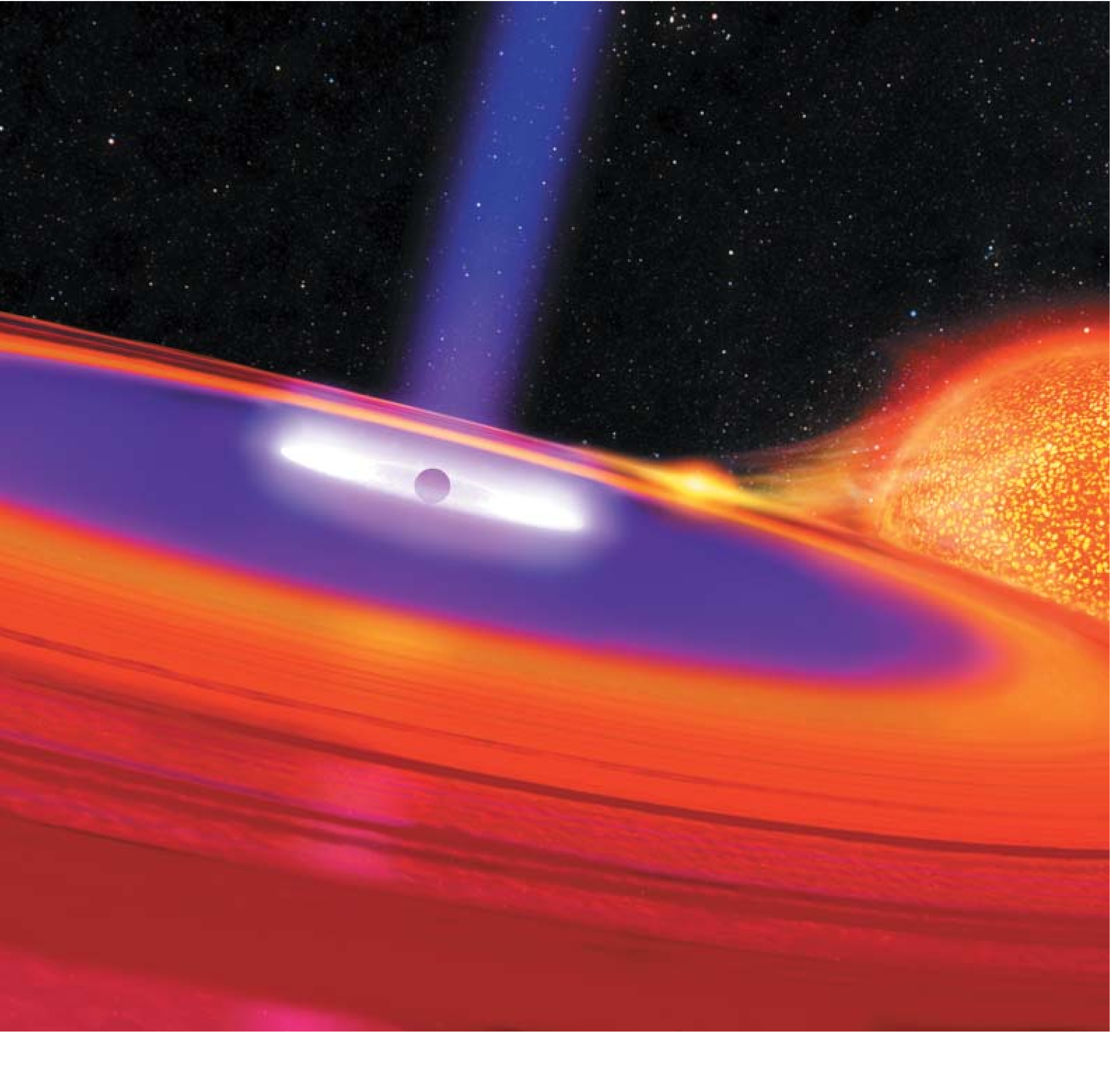
Todos los medios de difusión se han hecho eco del hallazgo espectacular en la isla indonesia de Flores: una nueva especie del género *Homo*, el *Homo floriensis*. Aquellos homínidos, de apenas un metro de alto, con cerebros del tamaño de un pomelo, vivían aún hace tan sólo 18.000 años. Sus proporciones corporales y cerebrales les asemejan a los mucho más antiguos australopitecos, pero la masticación y deambulación les incluyen en nuestro género. Los descubridores suponen que *H. floriensis* desciende de *H. erectus*; su pequeñez se debería al limitado suministro de alimentos de la isla. *H. sapiens* llegó a Asia hará unos 35.000 años, cuando debían todavía de sobrevivir, en la cercana Java, poblaciones de *H. erectus*. Durante milenios, pues, tres especies de *Homo* coexistieron en la región (y en Europa discurrían los últimos días de los neandertales). De su interacción, si llegaron a cruzarse por ejemplo, nada se sabe.

—Kate Wong



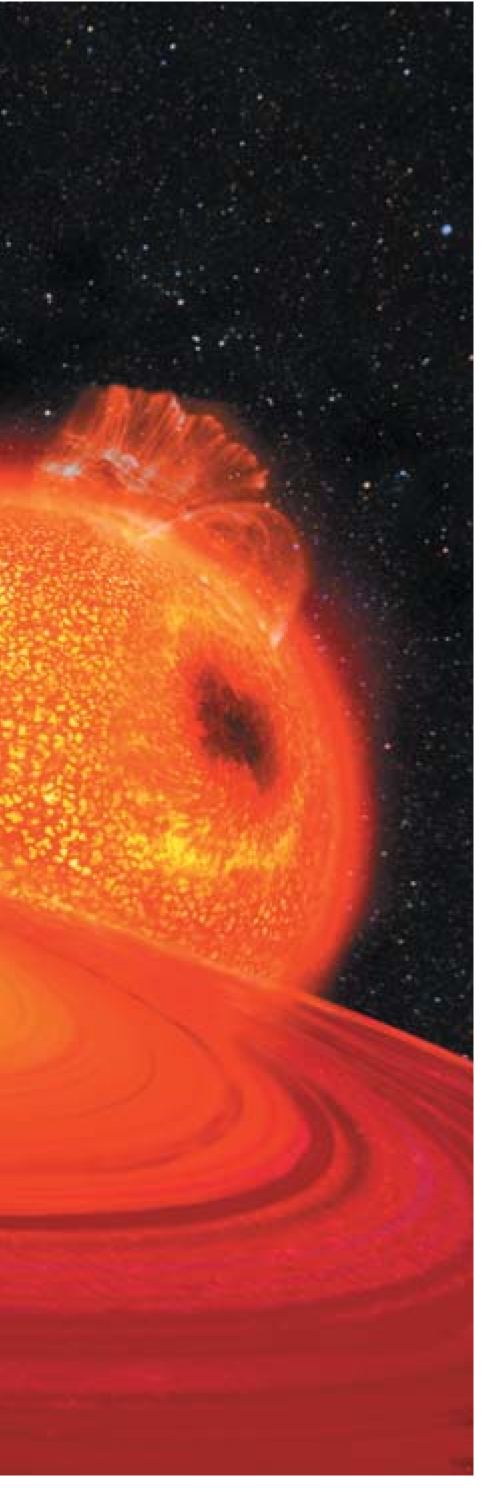
PETER BROWN

Homo floriensis (*izquierda*) tenía un tamaño mucho menor que el nuestro (*derecha*).



Un universo de discos

DON DIXON



1. UN DISCO DE ACRECION rodea a un agujero negro de un sistema binario de rayos X en esta representación artística. La poderosa gravedad del agujero negro arranca gas de la estrella compañera, una gigante roja. El disco de gas emite cantidades enormes de radiación en rayos X a medida que se enrosca en espiral en su caída hacia el agujero negro. El disco también crea chorros de partículas que salen disparadas desde la región más interna.

Nuevas investigaciones han descubierto la dinámica de los discos de gas que giran alrededor de estrellas jóvenes y gigantescos agujeros negros

Omer Blaes

Busquemos en el cielo, durante una noche clara, los planetas que se observan a simple vista: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter, Saturno. Si localizamos tres o más, veremos que se alinean a lo largo de una banda estrecha que describe un gran círculo en el firmamento. Esta banda encierra la eclíptica, el recorrido aparente del Sol a través de las constelaciones del zodíaco en el transcurso de un año. Y si nos fijamos en la lechosa mancha blanca de la Vía Láctea, nos percataremos de que traza otro gran círculo en el cielo.

Estas percepciones geométricas no son accidentales. Los planetas de nuestro sistema solar, incluida la Tierra, se mueven alrededor del Sol en el mismo sentido y casi en el mismo plano (con la excepción de Plutón). Es una prueba directa de que los planetas se formaron en un disco plano, una especie de tabla, cuyo material (gas y polvo) giraba alrededor de un Sol joven. De igual forma, la Vía Láctea —brumosa aglomeración de luz procedente de muchos miles de millones de estrellas— prueba que nuestra galaxia también presenta forma de disco. El sistema solar está inmerso en este disco; por eso parece que la galaxia nos envuelve.

Las estructuras con forma de disco abundan en el universo a escalas muy diversas. Los anillos de Saturno son una elegante muestra cercana a nosotros, pero sólo una: no hay planeta gigante del sistema solar que carezca de anillos. También se han observado discos alrededor de muchas estrellas jóvenes; se los llama discos protoplanetarios porque deben de asemejarse al que dio origen a nuestro sistema solar. En algunos sistemas binarios estelares escapa gas de una de las estrellas de la pareja y lo captura el campo gravitatorio de la otra. Se forma entonces un disco; en su interior, el gas se dirige lentamente hacia la superficie estelar con un apretado movimiento espiral, un remolino. Se cree que también hay estructuras así, o "discos de acreción", alrededor de los agujeros negros supermasivos del centro de las galaxias. (Por supermasivos hemos de entender aquí de una masa de mil millones de soles.) Pero los discos de mayor tamaño son las galaxias espirales, entre ellas nuestra Vía Láctea, cuyo diámetro abarca más de cien mil años luz.

Dada la ubicuidad de los discos en el universo, entender su naturaleza es una de las cuestiones más relevantes de la astrofísica. Se piensa que los discos de acreción que circundan los agujeros negros supermasivos afectan a la formación y evolución de las galaxias. Y la dinámica de los discos de acreción en torno a estrellas jóvenes podría arrojar nueva luz sobre la historia primitiva de nuestro sistema solar. Gracias a los nuevos desarrollos teóricos y a las modernas simulaciones por computadora, se ha dado no hace mucho con una explicación de la agitada turbulencia que convierte los discos de acreción en fuentes poderosas de energía. Pero existen otros fenómenos que han de explicarse todavía, como los chorros de partículas que con frecuencia manan de los discos. Queda aún mucho que investigar en los miles de millones de discos rotantes que pueblan el universo.

El tiovivo celestial

La rotación de un disco impide que la gravedad lo destruya. Imaginemos que estamos en un tiovivo que gira peligrosamente deprisa. Si no nos agarramos

con fuerza a uno de los caballitos, saldremos disparados a lo largo de una recta tangente al círculo del tiovivo. La tensión de nuestro brazo proporciona con exactitud la fuerza necesaria para que nos movamos en círculo y permanezcamos dentro del tiovivo. La rotación impide el movimiento hacia dentro; haría falta mucho esfuerzo para caminar en dirección al centro del tiovivo. De igual modo, la rotación de la materia de un disco impide que la fuerza de la gravedad lo destruya.

Los objetos que rotan están dotados de momento angular, magnitud que es proporcional a la velocidad de giro del objeto y la distribución de masa alrededor del eje de rotación (cuanto más alejada esté la masa del eje, mayor será el momento angular del objeto). El momento angular reviste importancia fundamental en nuestro análisis de los sistemas rotantes porque, al igual que la energía, es una cantidad que se conserva: no podemos crearla ni destruirla. Un patinador sobre hielo gira alrededor de su eje más rápido al cerrar los brazos sobre sí. Puesto que el momento angular ha de permanecer constante, al concentrarse la masa más cerca de su eje de rotación aumenta la velocidad de giro.

En la conservación del momento angular estriba la razón de que abunden tanto los discos en el universo. Pensemos en una nube de gas que colapsa por el poder atractivo de su propia gravedad. Cualquier agregación de materia del universo rota en una medida u otra; supongamos, pues, que esta nube tiene un momento angular inicial. A medida que vaya contrayéndose, el principio de la conservación del momento angular forzará a la rotación a ser más rápida (*véase el recuadro* "El nacimiento de un disco"). El material de la región ecuatorial de la nube —es decir, en el plano perpendicular al eje de rotación— se desplazará hacia el interior con lentitud creciente a medida que la rotación vaya equilibrando el empuje gravitatorio. El material situado en el eje de rotación caerá en vertical hacia el plano ecuatorial mucho más deprisa. El objeto resultante será un disco sostenido por la rotación.

Se piensa que este proceso explica la formación de discos protoplanetarios alrededor de las estrellas jóvenes, y quizá también la de los discos gaseosos que rodean a los agujeros negros de los centros de las galaxias. Que una galaxia entera se convierta en un disco depende de qué ocurra primero. Las galaxias espirales se constituyen en un gas al que la rotación ha conseguido sostener antes de que las masas del gas se contraigan en estrellas. Pero si las estrellas nacen del gas antes de que la nube galáctica se concentre en un disco, las estrellas mantendrán sus órbitas alrededor del centro galáctico y la galaxia será elíptica. Por lo general, las galaxias no se crean aisladas; los choques y fusiones galácticas complican mucho el proceso. Algunas de las galaxias elípticas, así como los bulbos y halos de las espirales, pueden haberse originado en choques de ese tipo.

Los discos de acreción aparecen también en sistemas de estrellas binarias cuando la gravedad de una de las estrellas del par (por ejemplo, una enana blanca, densa y compacta) atrae el gas de su compañera (de ordinario, una estrella menos compacta y mayor). Este gas contiene una gran cantidad de momento angular procedente del movimiento orbital de las dos estrellas alrededor del centro de masas común, por lo que no puede caer directamente hacia la enana blanca: el gas terminará formando un disco alrededor de la enana.

Así como el año de Mercurio es bastante más corto que el terrestre —unos 88 días—, el material de las regiones internas del disco necesita menos tiempo para completar una órbita que el material del exterior. Este gradiente de los períodos orbitales provoca una cizalladura: las porciones de material a distancias del centro del disco ligeramente diferentes se deslizarán entre sí. De haber alguna fricción en el material, frenará la rotación de las regiones internas, más rápida, y acelerará la de las externas, más lenta. Se transportará de esa forma momento angular del interior al exterior del disco. En consecuencia, la materia de las regiones internas perderá apoyo rotacional en favor de la gravedad y caerá al centro. El resultado global es una espiral de materia que cae hacia la estrella o agujero negro centrales.

A medida que la materia cae en espiral hacia las órbitas interiores del disco de acreción, deberá ceder energía potencial gravitatoria. Parte de esa energía se invertirá en imprimir al material una mayor velocidad orbital mientras cae; el resto se disipará, por la fricción, convertido en calor u otras formas de energía. De esa forma, el material de un disco alcanza temperaturas muy elevadas y emite cantidades ingentes de radiación visible, ultravioleta y de rayos X. La energía cedida puede hacer de los discos de acreción fuentes formidables de energía.

Este fenómeno alertó a los astrónomos de la existencia de los agujeros negros. Los agujeros negros no emiten luz de suyo, pero los discos de acreción a su alrededor sí la emiten. (Esta afirmación tan general ignora la radiación de Hawking, una emisión indetectable salvo en los agujeros negros más pequeños; todavía no se la ha observado en ningún punto del universo.) De acuerdo con la teoría general de la relatividad de Einstein, la energía cedida por un disco de acreción alrededor de un agujero negro debería equivaler casi al 10 % de la energía en reposo del material (igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz). Esta cantidad, espectacular, decuplica de lejos la energía generada por el propio material si sufriese reacciones termonucleares, como en las estrellas o las bombas de hidrógeno. No obstante, esta predicción se ajusta a las observaciones de

Resumen/Discos de acreción

- Los discos de gas se encuentran por todas partes: alrededor de las estrellas recién nacidas, en sistemas de estrellas binarias y en el centro de las galaxias. De ahí el especial interés por comprender su dinámica.
- Para explicar la radiación procedente de los discos, se parte de un supuesto: son turbulentos. Se cree que la "inestabilidad magnetorrotacional" es el origen de esa turbulencia.

la radiación de los cuásares, objetos muy luminosos cuya luz debió de proceder de discos de acreción alrededor de agujeros negros supermasivos en los centros de las galaxias tempranas. Cuando se calcula la energía total irradiada en el transcurso del tiempo por todos los cuásares de una región determinada del espacio, se comprueba que vale aproximadamente un 10 % de la masa de todos los agujeros negros supermasivos observados en una región equivalente, multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz.

Turbulencia en el espacio

Pero, ¿cuál es la naturaleza de esa fricción en el interior de los discos de acreción, capaz de generar tales energías? Quizá, las partículas que constituyen el material del disco sufran colisiones en las que intercambian pequeñas cantidades de energía y momento angular. Advertimos ese mecanismo en los anillos de Saturno: cuando las piedras y rocas que los pueblan chocan, pierden energía en forma de calor y se transfiere momento angular hacia el exterior. Los fluidos comunes actúan de manera similar: podríamos asociar los anillos de Saturno a un fluido viscoso donde en vez de moléculas chocan piedras. Con las colisiones los anillos tienden a expandirse radialmente, pero las lunas de Saturno actúan de reservas de momento angular y los mantienen dentro de sus límites.

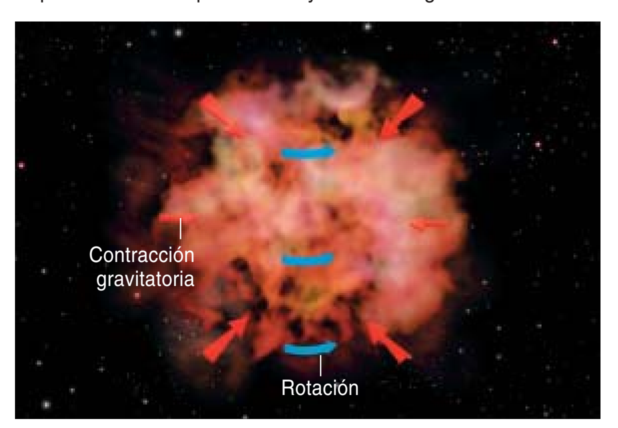
Por desgracia, este proceso tan simple no basta para explicar la actividad de muchos otros tipos de discos de acreción. En los discos de los sistemas binarios o de los centros galácticos, los choques entre partículas generan un flujo de masa demasiado pequeño, en varios órdenes de magnitud, para la luminosidad tan brillante observada. Pudiera ser que ondas espirales de gran escala del disco, parecidas a los brazos espirales de las galaxias, acelerasen el flujo de materia. Así como las ondas de sonido transportan la energía a través del aire, las ondas espirales llevarían energía y momento angular hacia el exterior, facilitando la acreción de materia hacia el interior. Se han encontrado indicios de estructuras espirales en los discos de acreción de algunos sistemas binarios. Pero esas ondas espirales no parecen tener la magnitud necesaria para que la caída de materia ocurra a un ritmo suficiente capaz de generar la radiación medida en los discos.

Muchos creen, no obstante, que la turbulencia es el mecanismo de fricción más extendido en los discos de acreción. Aceleraría el flujo de materia mediante choques a gran escala y muy violentos. Cuando el agua fluye por una tubería, la viscosidad del líquido aumenta la velocidad del flujo en el centro y la disminuye cerca del borde interior de la tubería. Si se fuerza al agua a ir más deprisa, las diferencias de velocidad aumentan y, con el tiempo, desestabilizan el flujo, haciéndolo turbulento y caótico. Puesto que los discos de acreción contienen también flujos con gradientes muy notables, se pensó, en los años setenta, que los discos debían de exhibir bastante turbulencia. Sin embargo, cuando se intentó reproducir el fenómeno mediante la aplicación de las ecuaciones básicas de los fluidos y simulaciones por ordenador, no hallaron prue-

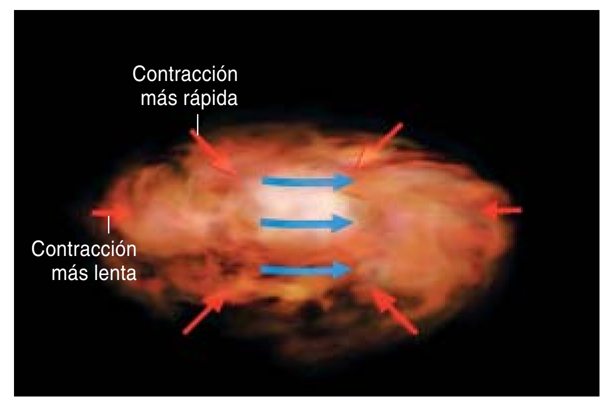
ALFRED T. KAMAJIAN

EL NACIMIENTO DE UN DISCO

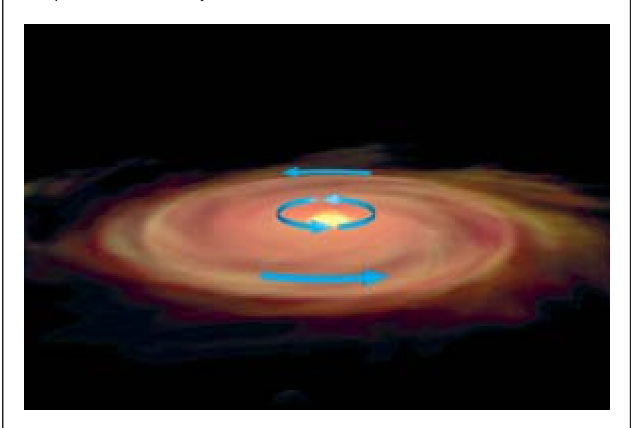
Se debe al principio de la conservación del momento angular el que los discos abunden en el universo. El momento angular es proporcional a la velocidad de rotación de un objeto y a la distribución de su masa en torno al eje de giro. Puesto que el momento angular ha de conservarse, un objeto rotante que se contraiga girará más rápido a medida que disminuye su envergadura.



Una nube de gas interestelar gira lentamente alrededor de su eje; se está desplomando sobre sí misma en razón de la fuerza atractiva de su propia gravedad. A medida que va colapsando, gira más deprisa.



El gas del plano ecuatorial de la nube se desplaza hacia el interior más despacio porque la rotación empieza a contrarrestar la gravedad. El gas suprayacente y subyacente al plano cae a mayor velocidad.

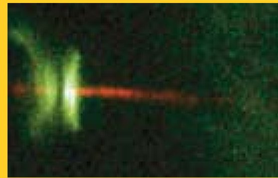


Con el tiempo, toda la materia de la nube cae hacia el plano ecuatorial, donde la rotación sostiene el gas: el movimiento contrarresta la gravedad.

Una galería de discos y chorros

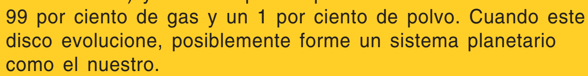
Se han visto discos por todo el universo, tanto alrededor de estrellas jóvenes en nebulosas de nuestra galaxia como en los centros de galaxias a millones de años-luz de distancia.

Discos protoplanetarios



En la nebulosa de Orión, a unos 1500 años-luz de la Tierra, un disco protoplanetario rodea una estrella que existe desde hace apenas un millón de años. El disco tiene un diámetro de unos 40.000 millones de kilómetros (tres veces el tamaño de nuestro sistema solar) y está compuesto por un 99 por ciento de gas y un 1 por ciento de polvo. Cuando este disco evolucione, posiblemente forme un sistema planetario como el nuestro.

Chorro de una estrella al nacer



HH-30, una estrella recién nacida a unos 450 años-luz de la Tierra, está sumergida en un disco protoplanetario (*aparece de canto a la izquierda de la figura*). En direcciones opuestas, a ambos lados del centro, se ven dos chorros de gas que se mueven a unos 960.000 kilómetros por hora. El campo magnético de la estrella podría estar canalizando el gas.

Galaxia espiral

NGC 7331, galaxia espiral a unos 50 millones de años-luz de la Tierra, es un disco parecido a nuestra Vía Láctea. Los datos obtenidos por el Telescopio Espacial Spitzer, un nuevo observatorio que analiza la radiación infrarroja, indican la presencia de un agujero negro supermasivo en el núcleo de esta galaxia.



Chorro de una galaxia activa

El núcleo activo de M87, galaxia elíptica gigante a unos 50 millones de años-luz de la Tierra, emite un chorro de electrones de alta velocidad que se extiende hasta unos 6500 años-luz del centro galáctico. Un disco de acreción que rota alrededor del agujero negro supermasivo envía la mayor parte de su energía al chorro.



M. J. MCCAUGHREAN *MPIA*, C. R. O'DELL *Universidad de Rice*, NASA, ESA (*Disco protoplanetario*); C. BURROWS *STScI*, J. HESTER *Universidad estatal de Arizona*, J. MORSE *STScI*, NASA (*HH-30*); M. REGAN ET AL. *STScI*, JPL, CALTECH, NASA (*NGC 7331*); *STScI*, NASA (*M87*)

bas de que en los discos de acreción se desarrollaran turbulencias.

Se debate todavía la razón de este resultado poco alentador. Pudiera ser que las simulaciones por ordenador fueran incorrectas; cabe también que la analogía con el flujo en una tubería no resulte apropiada y que un sistema rotante del estilo de un disco de acreción presente diferencias intrínsecas. Se han realizado experimentos en los laboratorios para buscar las turbulencias en flujos semejantes a los de los discos de acreción, pero de nuevo los resultados están sujetos a discusión. A pesar de que en estos experimentos se han observado turbulencias ocasionales, quizá se debiesen a efectos no presentes en los discos de acreción reales.

Pese a ello, los astrofísicos persisten en su creencia de que los discos son turbulentos. Con esta hipótesis de partida, la mayoría ha adoptado unas rudas ecuaciones para modelar los efectos de la turbulencia en los discos; las concibieron en 1973 Nikolai Shakura y Rashid Sunyaev. Cortando así el nudo gordiano, se han elaborado modelos teóricos de los discos de acreción que se comparan con las observaciones reales. Este método de trabajo ha cosechado varios éxitos en los últimos años. Por mencionar uno: ciertos discos de estrellas binarias experimentan en ocasiones un aumento temporal de su brillo (las novas, explosiones de luz procedentes de un disco de acreción que rodea a una enana blanca en un sistema binario, corresponden a este fenómeno). Se ha conseguido demostrar que tales incrementos transitorios de luminosidad están desencadenados por una inestabilidad en el disco que provoca que la materia fluya muy rápidamente hacia el interior.

A pesar de este logro, la aproximación de Shakura-Sunyaev es en realidad una tapadera de nuestra ignorancia. Las diferencias entre las predicciones de los modelos y las observaciones podrían deberse simplemente a que las premisas hoy aceptadas acerca de la turbulencia de los discos sean erróneas. Por otra parte, la turbulencia quizá presente otras consecuencias observables, aparte del transporte del momento angular por el disco, pero no resulta posible predecir cuáles sin aclarar los procesos que las originarían.

Un circuito astronómico

Por fortuna, en 1991 se produjo un espectacular avance en el problema de la turbulencia. Steven Balbus y John Hawley, de la Universidad de Virginia, se percataron de que si la materia de un disco de acreción conduce muy bien la electricidad y está magnetizada aunque sólo sea un poco, el campo magnético provocará una inestabilidad en el disco. La inestabilidad termina sin remedio en un flujo turbulento que transporta momento angular hacia fuera y disipa energía gravitatoria. Hoy día se piensa que este fenómeno, la "inestabilidad magnetorrotacional" (IMR), desempeña una función esencial en muchos discos de acreción.

Las líneas del campo magnético en un medio muy conductor se desplazan con el flujo. Allá donde vaya el material se desplazará el campo magnético. Las líneas de campo también ejercen fuerzas sobre el medio. En concreto, ejercen tensiones cuando se doblan o curvan, como las gomas elásticas.

Para comprender el efecto de las líneas del campo magnético, imaginemos dos partículas en órbita alrededor de la Tierra, amarradas entre sí por un resorte

elástico. Si las partículas se separasen momentáneamente (con una partícula acercándose un poquito más a la Tierra y la otra alejándose), pensaríamos que la tensión resultante en el resorte tendería a juntarlas de nuevo, como en la configuración original. Si la tensión es muy débil, sin embargo, su presencia separará aún más las partículas. La partícula que se desplazó hacia la Tierra deberá acelerarse en su nueva órbita para conservar el momento angular; la que se alejó deberá frenarse por la misma razón. El resorte estirado intentará frenar a la más rápida e interior y acelerar a la más lenta y externa. Desprovista de parte de su energía cinética, la partícula interior caerá aún más (y paradójicamente se acelerará en la nueva órbita), y el acelerón arrojará a la partícula exterior más hacia fuera (donde se desplazará con lentitud todavía mayor). Como resultado, el resorte transfiere momento angular de la partícula interior a la partícula exterior. En un disco de acreción formado por partículas cargadas, las líneas del campo magnético actúan de la misma forma.

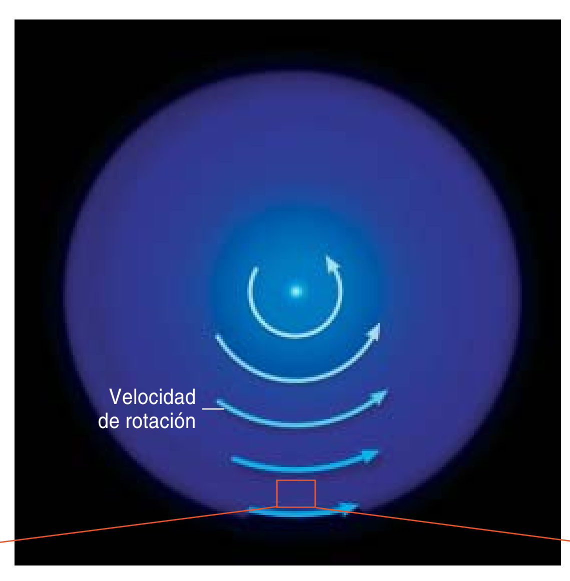
Es fácil imaginar cómo esta inestabilidad termina creando un flujo turbulento. Consideremos otro símil: un circuito donde los coches que corren por dentro vayan más deprisa que los que circulan por fuera. Supongamos que se enganchan cadenas entre los coches de las diferentes calzadas. Los de la calzada interior perderían momento angular al verse frenados, mientras que los de fuera lo ganarían porque se acelerarían. El resultado sería un completo y caótico desastre, como la turbulencia que se desarrolla en los discos de acreción.

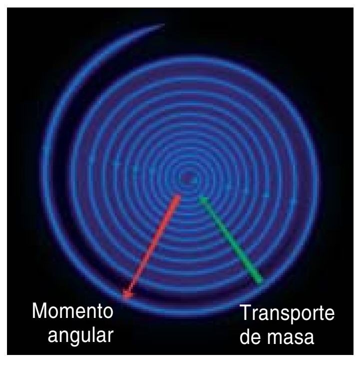
El descubrimiento de la inestabilidad magnetorrotacional ha revolucionado nuestro conocimiento de los discos de acreción. La situación es muy similar a la que se dio a principios del siglo XX, cuando los astrónomos se percataron de que la fuente primaria de energía de las estrellas eran las reacciones nucleares del núcleo estelar. Ahora, han encontrado el mecanismo que enciende fuentes más poderosas de energía, como los cuásares y los núcleos de galaxias activas (núcleos galácticos muy energéticos, también alimentados por material que cae hacia agujeros negros supermasivos). Se está estudiando el funcionamiento de la turbulencia magnetorrotacional en otras circunstancias físicas y de qué modo explicaría las diferencias observadas entre los varios tipos de discos de acreción.

Por ejemplo, algunos se preguntan si la turbulencia magnetorrotacional actúa en los discos protoplanetarios; y de hacerlo, ¿cómo? Estos discos constituyen un

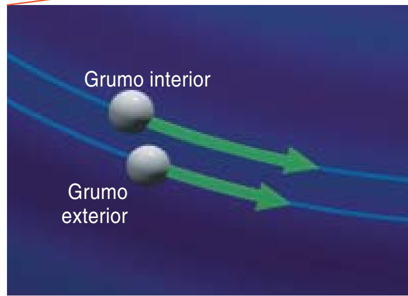
¿COMO RADIA Y GIRA EN ESPIRAL UN DISCO?

El material de las regiones internas de un disco necesita menos tiempo para completar una órbita que el material de regiones externas (*derecha*). Las porciones de materia localizadas cerca del centro del disco adelantan a las porciones algo alejadas. En un disco de acreción que rodee a una estrella o a un agujero negro, grumos de gas a gran escala chocan violentamente en el seno de un flujo turbulento (*abajo*). Este proceso transporta momento angular hacia fuera; en virtud de ello, parte del gas pierde apoyo rotacional y gira en espiral hacia el interior (*a la derecha*). Y puesto que las colisiones calientan el material, el disco radia grandes cantidades de luz visible, ultravioleta y rayos X.

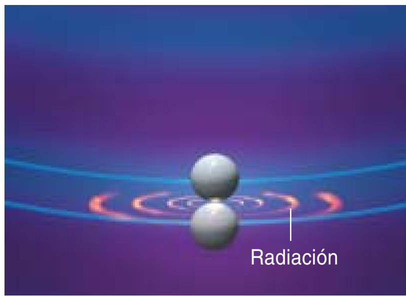




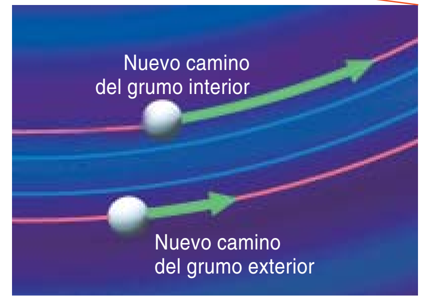
A causa de todos esos choques, el momento angular se transfiere hacia las regiones externas del disco y el gas gira en espiral hacia la estrella central o agujero negro.



Dos grumos de gas en órbitas ligeramente diferentes chocan porque el grumo interior se mueve un poco más deprisa que el exterior.



El choque transfiere energía y momento angular del grumo interior al exterior. El gas calentado genera radiación.

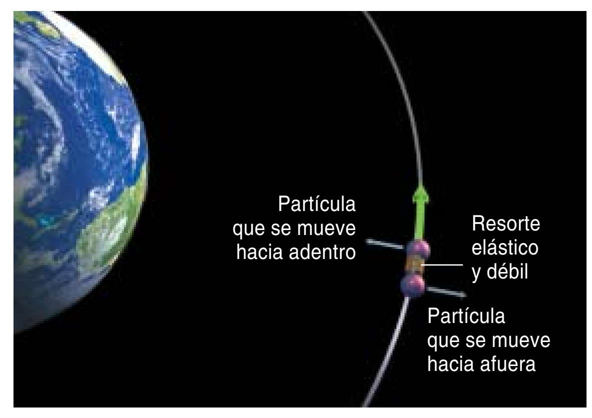


Desprovisto de parte de su energía, el grumo interior cae a una órbita de menor radio y el gas se acelera. La gota exterior se desplaza a una órbita más alejada y se frena.

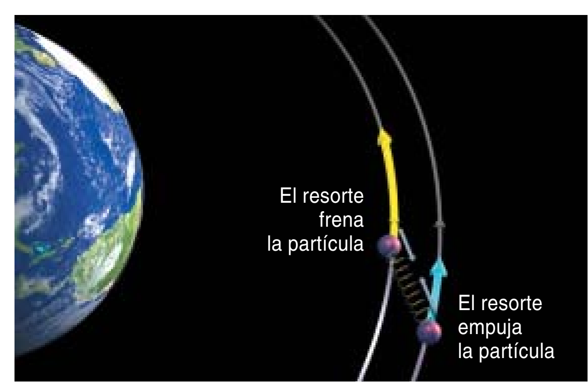
ALFRED T. KAMAJIAN

LA INESTABILIDAD DEL DISCO

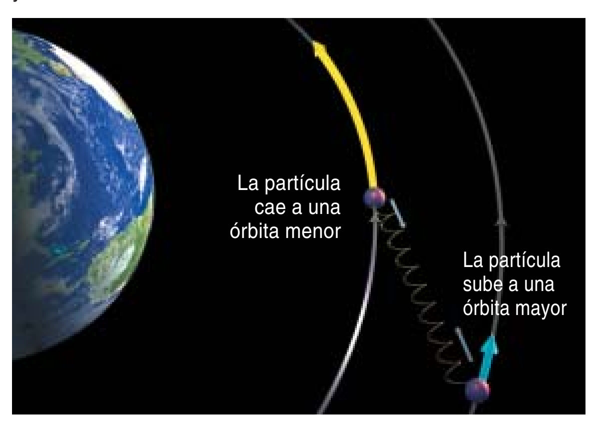
Se admite que los discos de acreción desarrollan turbulencias, basándose en que las partículas cargadas que contienen están unidas por las líneas del campo magnético, que tienden a juntar las partículas que se separen. Pero si el campo magnético es débil, podría separar las partículas aún más. Este fenómeno, llamado inestabilidad magnetorrotacional, se entiende mejor con la imagen de dos partículas conectadas por un resorte elástico que no ejerza una fuerza de recuperación grande.



Supongamos que las dos partículas están girando alrededor de la Tierra y que un choque aleatorio acerca una a la Tierra (por lo tanto la acelera) y aleja a la otra partícula (frenándola).



El resorte elástico intenta juntar las dos partículas. La tensión del resorte tira hacia atrás de la partícula más rápida e interna y hacia delante de la más lenta y externa.



Puesto que la partícula interior pierde energía, cae y gana velocidad. La partícula exterior accede a una órbita más alejada y se frena. Esta inestabilidad conduce al flujo turbulento.

ALFRED T. KAMAJIAN

entorno mucho más frío que los medios que rodean a las enanas blancas, estrellas de neutrones o agujeros negros, debido a la menor gravedad de la estrella central. En consecuencia, los discos están compuestos por polvo y gas eléctricamente neutros en mayor cuantía que de plasma ionizado. No está claro que los campos magnéticos puedan afectar a los flujos de un material así.

Mi grupo y otros equipos intentan averiguar cómo operan las turbulencias magnetorrotacionales en los discos de acreción calientes y opacos que circundan a los agujeros negros. Las turbulencias en estos medios llegan a ser supersónicas; forman y alteran ondas de choque de partículas cargadas de la misma manera que un avión supersónico produce estampidos. Puesto que esta actividad cede energías elevadas a los fotones, y puesto que los fotones se desplazan con mayor facilidad a través de las regiones más transparentes que quedan entre las ondas de choque, la turbulencia magnetorrotacional imprime pautas características en la radiación; deberían observarse en los sistemas con agujeros negros.

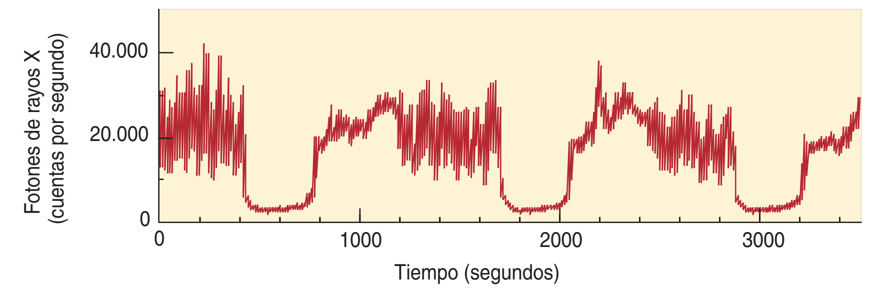
Oscilaciones y chorros

Se da por cierto que los discos de acreción albergan muchos flujos turbulentos. No es, pues, de extrañar que las observaciones presenten un alto nivel de variabilidad. Las variaciones son con frecuencia aleatorias y caóticas, aunque en ocasiones hay cierto orden dentro del caos. Una y otra vez aparecen inexplicables patrones en la intensidad de la luz emitida; en ocasiones, se aprecian oscilaciones de frecuencia bastante bien definida. El satélite "Explorador en el Tiempo de Rayos X Rossi", que puede medir cambios rápidos en el brillo en rayos X, ha aportado mucho al estudio de las oscilaciones de los discos de acreción alrededor de estrellas de neutrones y agujeros negros de masa estelar (con masas entre 4 y 15 veces la del Sol).

Se desconoce el origen de estas variabilidades o de las frecuencias de oscilación. Una posibilidad muy atractiva, propuesta por el equipo de Robert Wagoner, de la Universidad de Stanford, es que refleje los modos discretos de vibración del disco, similares a los armónicos de las cuerdas de un violín. Y así como las notas producidas por una cuerda de violín revelan su tensión y masa, las frecuencias observadas en un disco de acreción informarían sobre la estructura del disco y del espacio-tiempo alrededor de una estrella de neutrones o un agujero negro.

Aunque una buena parte de la energía de atracción gravitatoria cedida por la materia que cae en espiral en los discos de acreción termina en forma de radiación, en algunas ocasiones desencadena vientos y chorros de partículas procedentes del disco. Se quiere ahora investigar cómo se crean los chorros y qué determina el reparto de la energía de la acreción en luminosidad radiativa y cinética. Con toda probabilidad, los distintos tipos de discos cuentan con mecanismos diferentes para expulsar partículas. En algunos casos, los chorros ejercen también un control sobre el disco, ya que no sólo transportan masa y energía hacia fuera, sino que se llevan grandes cantidades de momento angular.

Un posible mecanismo generador de una clase de chorros es la presión fotónica generada por el propio



2. APARECEN EXTRAÑOS PATRONES en la radiación de rayos X de discos de acreción como el de GRS 1915+105, que rodea al agujero negro de un sistema binario situado a unos 40.000 años-luz de la Tierra. Se desconoce el origen de estas oscilaciones.

ELIZA JEWETT, ADAPTADO DE FIGURA 4D POR BELLONI ET AL. EN A&A, VOL. 355, 271–290; 2000

disco. Aunque los fotones tengan masa nula, llevan asociado un momento. Cuando los fotones interaccionan con la materia, cambian momento con las partículas contra las que chocan; ejercen, por lo tanto, una fuerza sobre ellas (en ese principio se basan las velas solares). Se sabe que los fotones ultravioletas de las estrellas jóvenes de masa elevada producen vientos de partículas al dispersar los átomos y iones que rodean a la estrella. De la misma forma, los fotones ultravioleta de los discos de acreción que rodean a enanas blancas y a núcleos de galaxias activas o cuásares podrían producir y acelerar vientos.

Algunos sistemas —las estrellas jóvenes, ciertas clases de núcleos de galaxias activas— generan chorros de partículas muy estrechos y rápidos que se extienden varios años-luz de distancia en el caso de las estrellas jóvenes y más de varios millones de años-luz en el de los núcleos activos. Que estos chorros permanezcan colimados hasta tales distancias sugiere la presencia de un campo magnético. (También se deduce la presencia de estos campos de los efectos en la polarización de las radioondas.) Se cree que el propio disco está magnetizado. La rotación podría retorcer las líneas de campo en una hélice. La tensión de las líneas de campo que girasen en espiral a lo largo de un chorro de partículas contribuiría sin duda a mantenerlas encerradas en el chorro. En los años ochenta, Roger Blandford y David Payne, del Instituto Tecnológico de California, apuntaron que la rotación del disco arroja también materia hacia fuera siguiendo las líneas de campo; por ese medio podría facilitarse la aceleración y la masa iniciales para cargar el chorro. Por desgracia, no sabemos cómo relacionar el flujo de acreción hacia el interior del disco, plagado de complejas turbulencias magnetorrotacionales, con la estructura ordenada de los chorros hacia el exterior.

Los astrofísicos llevan docenas de años investigando los discos de acreción. Creemos que ahora contamos con un conocimiento básico de estos sistemas. Debido a nuestro estudio continuo de las turbulencias magnéticas en distintos entornos, esperamos entender algún día la rica variedad de fenómenos que exhiben estos discos rotantes. Fue un disco de acreción el que dio origen a nuestro sistema solar. Conocer la dinámica de tan fascinantes objetos nos ayudará a explicar el camino que nos trajo a la existencia.

El autor

Omer Blaes es profesor de física de la Universidad de California en Santa Bárbara. Se doctoró en 1985 en la Escuela Internacional de Estudios Avanzados de Trieste.

Bibliografía complementaria

GRAVITY'S FATAL ATTRACTION: BLACK HOLES IN THE UNIVERSE. M. Begelman y M. J. Rees. W. H. Freeman and Company, 1998.

ACCRETION POWER IN ASTROPHYSICS. Tercera edición. Juhan Frank, Andrew King y Derek Raine. Cambridge University Press, 2002.

ACCRETION PROCESSES IN STAR FORMATION. Lee Hartmann, Cambridge University Press, 2004.

La formación de los supercontinentes

Según una hipótesis, se constituyen de acuerdo con un modelo de acordeón, vale decir, de aproximación y distanciamiento; a tenor de otra, los continentes se separan y se desplazan por el planeta hasta reunirse, de nuevo, en el lado opuesto

J. Brendan Murphy y R. Damian Nance

En un ejercicio de humildad, no deberíamos dar nada por sentado; ni siquiera la firmeza de la tierra que pisamos. El registro geológico indica que hace entre 300 y 200 millones de años las masas continentales estaban reunidas en un supercontinente, Pangea (voz de origen griego que significa "todas las tierras"), rodeado de un superocéano, Panthalassa ("todos los mares"). Es más, en el transcurso de los últimos 200 millones de años, la evolución de la Tierra ha estado dominada por la disgregación de Pangea y la formación de nuevos océanos (el Atlántico, por ejemplo) entre los continentes resultantes de la fragmentación.

Pero Pangea no ha sido el único supercontinente de la historia geológica de nuestro planeta. Las investigaciones de los últimos 20 años apuntan que éste fue sólo el último de una serie de supercontinentes que se formaron y disgregaron a lo largo de más de 3000 millones de años. Aunque todavía no existe acuerdo sobre el mecanismo responsable, los expertos coinciden en afirmar que se han producido varios ciclos de congregación y disgregación, con una profunda influencia en la evolución de la corteza terrestre, la atmósfera, el clima y la vida durante miles de millones de años.

Según parece, la constitución de Pangea vino precedida, hace entre 650 y 550 millones de años, por la formación de Pannotia y, hace alrededor de 1000 millones de años, por la de Rodinia, cuya configuración es todavía objeto de debate. Se supone que otro supercontinente, llamado Nuna o Columbia, se formó hace 1800 millones de años; otros dos, Kenorlandia y Ur, lo harían hace 2500 y 3000 millones de años, respectivamente.

De acuerdo con la afirmación uniformista de que "el pasado encierra las claves del presente", resulta harto probable que se formase en el futuro otro supercontinente. Pero, ¿cuál será el mecanismo soldador? Se han propuesto dos hipótesis. Una sostiene que los continentes se acercan y alejan como los pliegues del fuelle de un acordeón. A tenor de una segunda, los continentes, disgregándose, avanzan por el planeta hasta reunirse, de nuevo, en el lado opuesto. Para determinar cuál de los dos modelos describe mejor la formación de los supercontinentes, debemos empezar por revisar los principios básicos de la *tectónica de placas*, la teoría que revolucionó la geología al aportar una explicación de las fuerzas que operan en la conformación de la Tierra.

Tectónica de placas

Según la tectónica de placas, la Tierra cuenta con una capa externa y rígida, la *litosfera*, de unos 100 a 150 kilómetros de espesor; cabalga a lomos de una capa plástica y caliente del manto terrestre, la *astenosfera*. Como si fuera una cáscara de huevo resquebrajada, la litosfera se encuentra dividida en un mosaico de unos 20 bloques, o placas, que se mueven unas respecto a las otras a menos de 10 centímetros por año. En su deriva, interaccionan entre sí en sus límites o bordes de placa; así, convergen y chocan, divergen y se alejan, o se deslizan lateralmente una respecto a la otra. Durante los millones de años que vienen dándose tales interacciones se han levantado montañas (donde las placas chocaban) y



1. LA TECTONICA DE PLACAS, la teoría que ofrece una descripción global de las fuerzas que han conformado la Tierra, sostiene que los continentes están en constante movimiento: se escinden, colisionan y se deslizan unos bajo otros. Sabemos ahora que se trata de un fenómeno cíclico: en el transcurso del tiempo geológico, los continentes se han ensamblado en supercontinentes y vuelto a separar como mínimo en seis ocasiones. Este ciclo supercontinental plantea una cuestión compleja: ¿se separan y acercan los continentes como los pliegues de un acordeón o se dividen y se dispersan para reunirse de nuevo en el lado opuesto del planeta? Los autores han intentado hallar la respuesta mediante el análisis isotópico. En esta imagen de satélite se observa la colisión entre la placa árabe y la parte iraní de la placa eurasiática: un proceso que, de forma gradual, cierra el golfo Pérsico y levanta montañas.

IMAGEN CEDIDA POR EL CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES DE LA NASA/*American Scientist*

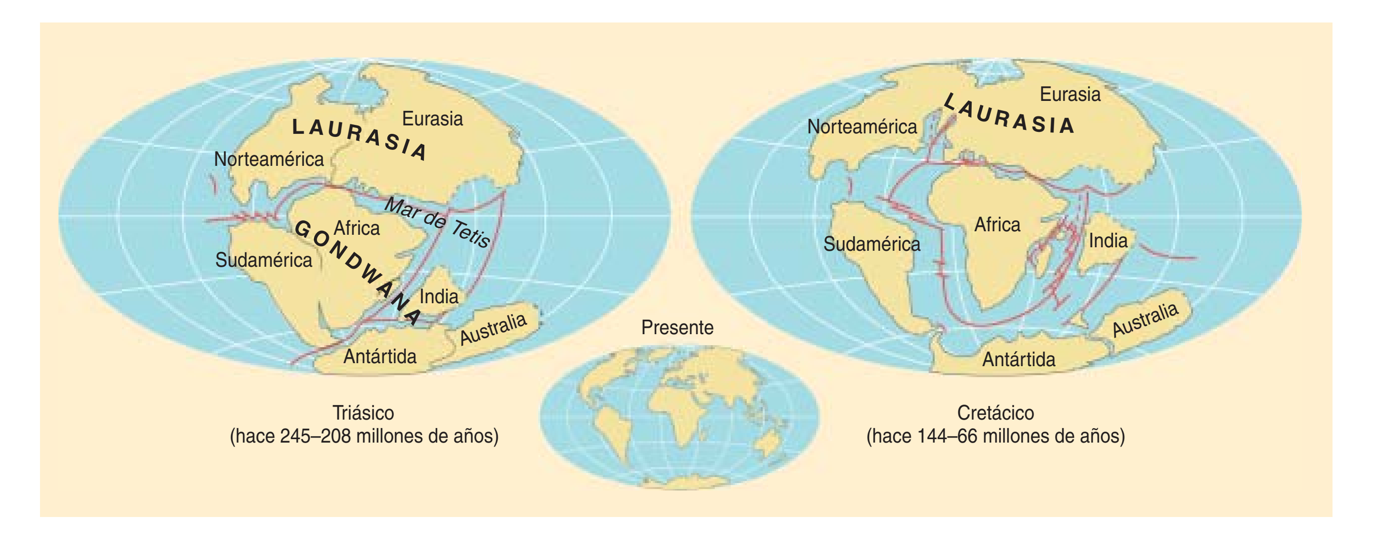
se han dividido continentes (donde las placas divergían).

Los continentes, enraizados en las placas, derivan pasivamente con ellas. Ese movimiento se traduce, en el transcurso de millones de años, en la apertura y el cierre de océanos enteros. Por ejemplo, durante los últimos 180 millones de años, la divergencia entre Europa/Africa y Norteamérica/Sudamérica ha dado lugar al océano Atlántico. El borde de la placa, a lo largo de la cual estos continentes se separan, toma la forma de una dorsal meso-oceánica que recorre longitudinalmente la cuenca oceánica. Desde la cresta de esta dorsal se extiende, a ambos lados, nuevo lecho oceánico, conforme el magma caliente que procede del manto subyacente asciende, se enfría y solidifica, generando así nueva litosfera entre las placas divergentes.

En una Tierra de radio constante, la creación de nueva litosfera debe compensarse con la destrucción de litosfera más antigua. Al propio tiempo que el océano Atlántico se abría, la convergencia de Africa con Europa, y de la India con Asia, cerraba el Tetis, un antiguo océano, mientras el desplazamiento hacia el oeste del continente americano mermaba buena parte del océano Pacífico.

Cuando los continentes convergen, la litosfera oceánica intermedia se hunde en el manto y retorna al interior de la Tierra en un proceso de *subducción*. En general, la corteza oceánica es más densa que la corteza continental; por tanto, cuando ambas se encuentran en el margen de una placa que converge, la litosfera oceánica subduce, hundiéndose bajo la placa continental. El hecho de que gran parte de la litosfera oceánica sea más joven que la litosfera coronada con corteza continental —menos de 180 millones de años de antigüedad frente a más de 4000— explica la destrucción preferente de litosfera oceánica. Así, para que un océano como el Tetis se cerrara, tuvo que subducirse más litosfera de la que se creó en sus dorsales meso-oceánicas.

De acuerdo con la teoría de la tectónica de placas, el proceso de



2. LA RUPTURA Y DISPERSION del supercontinente Pangea en el transcurso de los últimos 200 millones de años ha supuesto la creación y expansión del océano Atlántico, así como la destrucción de una cantidad equivalente de litosfera en el océano Pacífico y el mar de Tetis.

subducción interviene, directa o indirectamente, en la formación de montañas u *orogenia*. El proceso directo comienza cuando la fría y densa litosfera oceánica se calienta en su descenso hacia el interior de la Tierra y desencadena una serie de procesos sobre la zona de subducción; la generación de magma fundido y ascendente es uno de ellos. Este magma se dirige luego a la superficie, donde alimenta volcanes y acrecienta la corteza, generando montañas. La cordillera de los Andes constituye un ejemplo moderno de montañas formadas mediante este proceso; un gran número de sus más altas cimas muestran, o han mostrado en su pasado reciente, actividad volcánica.

Un proceso orogénico indirecto puede comenzar con el choque entre un continente y pequeñas masas continentales o islas oceánicas, también denominados *terranes* o *litosferoclastos*. Si la litosfera oceánica que separa las islas (Japón o el archipiélago de Hawai, por ejemplo) de las masas continentales se consume por subducción, éstas son progresivamente empujadas hacia el continente hasta colisionar. El choque deforma las rocas y desencadena una actividad volcánica; la conjunción de ambos factores genera montañas. Pensemos en las montañas de la costa occidental de Norteamérica; durante los últimos 200 millones de años, este margen continental ha sufrido repetidas colisiones con numerosas islas del Pacífico que han acrecido la placa norteamericana en unos 500 kilómetros hacia el oeste, desde la Baja California hasta Alaska. Los procesos de subducción y las colisiones de litosferoclastos forman *orógenos periféricos*, llamados así porque se constituyen a lo largo de la periferia de los continentes.

Si la placa que subduce transporta corteza continental, resulta inevitable la colisión entre continentes. A medida que los continentes chocan frontalmente, el océano entero se cierra y se levantan montañas enormes. La colisión entre la India y Asia meridional, que dio lugar al Himalaya, y la del norte de Africa con el sur de Europa, que originó los Alpes, constituyen ejemplos modernos de este tipo de orogenia. Puesto que ambos episodios se debieron a la total destrucción de los bordes continentales, las montañas así formadas se consideran *orógenos interiores*. Ambas surgieron de la desaparición del mar de Tetis, que se cerraba al tiempo que se abría el océano Atlántico.

El ciclo supercontinental

Con la depuración de las técnicas de datación geológica, los expertos se han percatado de que la actividad orogénica no ha seguido una distribución uniforme en el tiempo. Hubo intervalos cortos (de unos 100 o 200 millones de años), en los que se produjeron numerosas colisiones continentales, e intervalos largos (de 300 millones de años o más), en los que apenas se registró dicha actividad orogénica. El descubrimiento de ese fenómeno condujo a la hipótesis del *ciclo del supercontinente*; según reza la misma, la congregación transitoria de todos los continentes en una sola masa continental, o supercontinente, acontece, en cifras redondas, cada 500 millones de años.

¿Cómo se reconocen en el registro geológico las fases de este ciclo? Varios fenómenos denuncian períodos de ruptura y separación. En primer lugar, la inyección de magma en las fracturas creadas por un proceso de distensión continental: se forman *enjambres de diques* basálticos; más tarde, en segundo lugar y a medida que los continentes se van distanciando, se desarrollan márgenes continentales (como los del Atlántico actual) y se genera nueva litosfera oceánica en las dorsales meso-oceánicas. En su mayoría, los geólogos opinan que un supercontinente se fragmenta y dispersa porque actúa a modo de cubierta aislante que evita el escape del calor del manto, lo mismo que un sombrero en nuestra cabeza. Así, el manto se calienta, generando magma basáltico que asciende a la superficie.

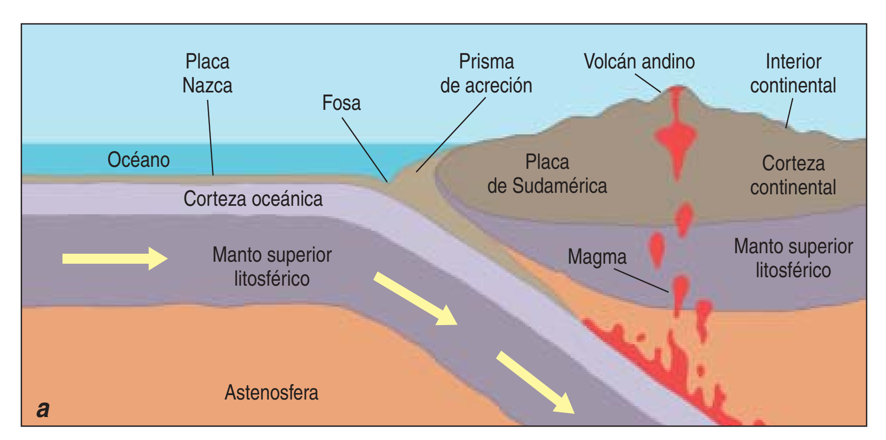
La convergencia continental, que renueva el proceso de ensamblaje del supercontinente, se desarrolla a través de varias etapas: subducción y destrucción de la litosfera

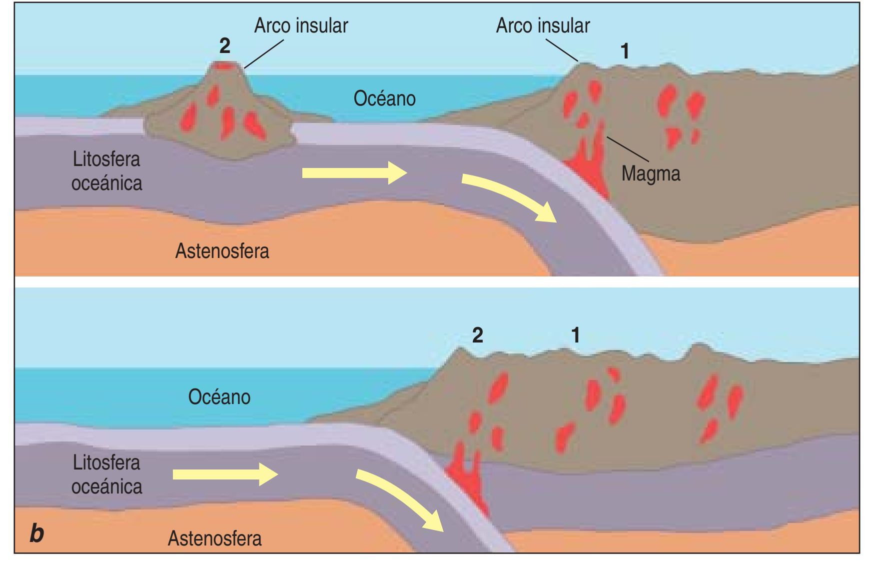
Sigma Xi/American Scientist

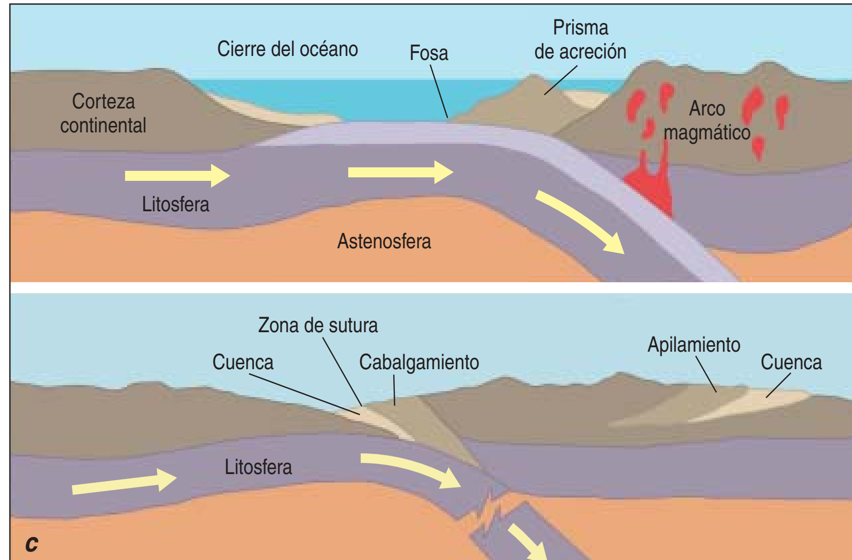
Cronología de los supercontinentes

Evento	Millones de años antes del presente
Separación de Pangea	~200
Formación de Pangea	~300–250
Separación de Pannotia	~550
Formación de Pannotia	~600
Separación de Rodinia	~760
Formación de Rodinia	~1100
Formación de Nuna/Columbia	~1800
Formación de Kenorlandia	~2500
Formación de Ur	~3000

3. EN EL TRANSCURSO de la historia geológica se han formado, al menos, seis supercontinentes.







4. FORMACION DE MONTAÑAS y movimiento de los continentes. Existen tres tipos de procesos orogénicos básicos. La subducción genera montañas mediante el ascenso de magma y calor (*a*); los Andes constituyen un ejemplo. La subducción transporta también litosferoclastos oceánicos y fragmentos microcontinentales hacia los márgenes continentales, donde se agregan (*b*); el margen occidental de Norteamérica ha protagonizado varios de estos episodios de acreción durante los últimos 200 millones de años. La colisión entre continentes sucede cuando se consume la litosfera oceánica intermedia (*c*); así se han formado los Alpes y el Himalaya.

Sigma Xi/American Scientist

oceánica intermedia, acreción de litosferoclastos en los márgenes continentales y, por fin, colisión continente-continente. Hoy se acepta que las placas oceánicas envejecen, se enfrían y se tornan más densas, hasta terminar por hundirse en el manto. La discusión se centra ahora en las fuerzas que originan dicha subducción. Cuando la placa oceánica desciende por el manto, la gravedad tira del resto de la placa (a la manera de un mantel muy descentrado, que resbala y cae al suelo). Así, los continentes que se hallan en placas que se hunden son arrastrados hacia las zonas de subducción, donde terminan por colisionar.

Tras la ruptura del supercontinente, los márgenes de cola de los continentes se vuelven tectónicamente inactivos; en ellos se acumulan sedimentos que conforman extensas plataformas continentales (por ejemplo, las desarrolladas a lo largo del océano Atlántico tras la fragmentación de Pangea). Al propio tiempo, la actividad orogénica relacionada con la subduc-

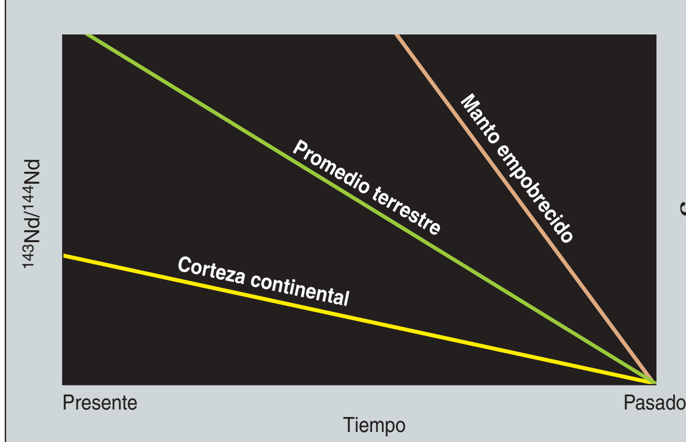
CRONOLOGIA MEDIANTE ANALISIS ISOTOPICO DE TIERRAS RARAS

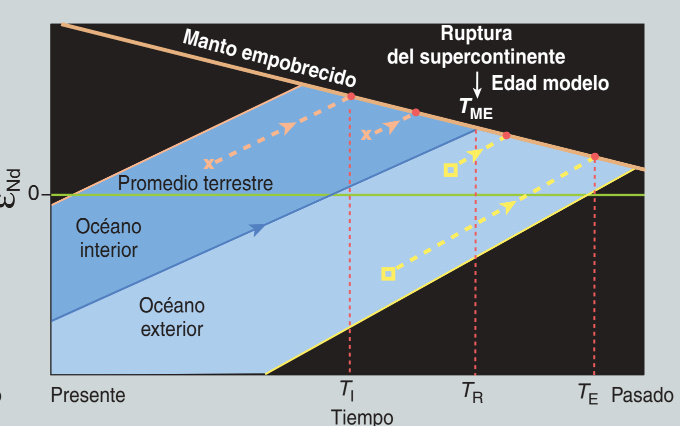
EL ANALISIS ISOTOPICO ha venido constituyendo el método habitual para determinar la edad de cristalización de rocas y minerales. Pero se ha empezado a aplicar para descubrir la génesis de una roca o un mineral, seguida, en ocasiones, de varias refundiciones y recristalizaciones. La pareja formada por el samario (Sm) y su producto de desintegración, el neodimio (Nd), representa uno de los mejores trazadores de dichos procesos tectónicos. Ambos pertenecen a la familia de las "tierras raras ligeras" y a la serie de los lantánidos, en el grupo 3 de la tabla periódica. El samario cuenta con 62 protones en su núcleo (su número atómico), dos más que el neodimio.

Puesto que Sm y Nd alcanzan un tamaño (radio iónico) y número de electrones de valencia similares, sus propiedades químicas y su comportamiento en la corteza terrestre guardan semejanza. Por tanto, la relación Sm/Nd resulta poco afectada por la generación de magma y otros procesos orogénicos. Antes bien, la variación en la relación Sm/Nd cortical se hereda del manto originario de la roca. Al fundirse el manto, todas las tierras raras ligeras tienden a concentrarse más en el fluido que en el manto restante, que queda *empobrecido*. Esto se debe a que, en general, el radio iónico de los lantánidos decrece con el incremento del número atómico (nos referimos a la *contracción de los lantánidos*). Tal recorte del radio iónico provoca que las tierras raras pesadas se adapten mejor a los sólidos que las ligeras. Dado que el número atómico del neodimio (60) es menor que el del samario (62), el radio del primero es algo mayor que el del segundo; por tanto, el Nd se concentra más en los líquidos que abandonan el manto y el Sm en el manto empobrecido restante.

La relación Sm/Nd media de la Tierra se sitúa alrededor de 0,32. Puesto que el neodimio tiende a concentrarse en los líquidos atrapados por la corteza y el samario lo hace en el manto empobrecido, el valor de Sm/Nd en las rocas de la corteza es menor (próximo a 0,2) y el del manto empobrecido mayor (próximo a 0,5) que el promedio terrestre.

El samario cuenta con 21 isótopos conocidos. Uno de ellos es radiactivo: el samario 147 (^{147}Sm). Se desintegra produciendo un isótopo estable, el neodimio 143 (^{143}Nd) y emitiendo una partícula alfa (dos protones y dos neutrones) desde su núcleo. Conforme esto sucede, aumenta la cantidad de ^{143}Nd y disminuye la de ^{147}Sm. La edad media de esta desintegración es de 106.000 millones de años. El neodi-





El manto empobrecido, la fuente de la corteza, retiene más samario (Sm) que neodimio (Nd). Por ello, el valor de Sm/Nd en el manto ($\sim$0,5) es mayor que el promedio terrestre ($\sim$0,32) y que el de la corteza continental ($\sim$0,18). Como resultado de las variaciones de la relación Sm/Nd y la desintegración del ^{147}Sm en ^{143}Nd, la relación ^{143}Nd/^{144}Nd aumenta más rápidamente en el manto empobrecido que en el promedio terrestre y en la corteza continental (*arriba*). La diferencia entre $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$ del manto empobrecido y $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$ de las rocas litosféricas, ambas en referencia al promedio terrestre, se expresa como ε_{Nd} (ε_{Nd} para el promedio terrestre resulta, siempre, nulo; por tanto, describe una línea horizontal). La relación Sm/Nd y ε_{Nd} de una muestra (calculados para la edad de la roca) se emplean para describir una línea de crecimiento (*línea azul*) que se retrotrae hasta su intersección con la línea del manto empobrecido. Esta intersección proporciona una "edad del manto empobrecido" (T_{ME}), que refleja el momento en que la corteza se originó a partir del manto empobrecido. Así, la muestra T_I (*cruz rosa*) se originó después (océano interior) y la muestra T_E (*cuadrado amarillo*) se creó antes (océano exterior) que se produjera la disgregación continental (T_R).

ción continúa a lo largo de los márgenes de avance de los continentes; ello provoca una sucesión de colisiones con litosferoclastos y la consiguiente actividad volcánica; se advierte de un modo arquetípico en el margen occidental del continente americano desde la ruptura de Pangea.

La formación de un supercontinente

En los últimos 30 años han surgido dos modelos distintos que describen, a escala global, las fuerzas que operan en la formación de los supercontinentes. En esencia, estos modelos divergen en la clase de océano que se cierra durante el ensamblaje supercontinental. Cuando un supercontinente se fractura, se disgrega y dispersa, el planeta hereda dos tipos de océanos bien diferenciados. Por una parte, entre las masas continentales en dispersión se abren océanos *interiores* sobre un fondo de litosfera oceánica

mio cuenta con siete isótopos estables, incluyendo el neodimio 144 (^{144}Nd); éste no se produce vía desintegración radiactiva, por lo que su concentración en una roca no cambia con el tiempo.

Debido a la desintegración de ^{147}Sm en ^{143}Nd, en el transcurso del tiempo geológico la relación ^{143}Nd/^{144}Nd ha aumentado en las rocas corticales, en el manto empobrecido y en el promedio terrestre. Sin embargo, puesto que la relación Sm/Nd del manto empobrecido es mayor que la media de la Tierra y ésta, a su vez, mayor que Sm/Nd en la corteza, la razón ^{143}Nd/^{144}Nd aumenta más deprisa en el manto empobrecido que en el promedio terrestre, y más rápidamente en el promedio terrestre que en la corteza. En consecuencia, la composición isotópica Sm-Nd de los magmas generados en la corteza muestra una notable diferencia respecto a la de los magmas generados en el manto empobrecido.

Una vez fundidos, los magmas adquieren la misma relación ^{143}Nd/^{144}Nd que su fuente. Los que proceden de la fusión del manto empobrecido mostrarán relaciones ^{143}Nd/^{144}Nd superiores que los que proceden de la fusión de la corteza. Si se conoce la edad de cristalización de la roca, puede cuantificarse la desintegración ocurrida desde la cristalización y deducir la relación ^{143}Nd/^{144}Nd en el magma original. Esta *relación inicial*, $(^{143}\mathrm{Nd}/^{144}\mathrm{Nd})_0$, opera como una huella dactilar del origen del magma.

Las diferencias en los valores de $(^{143}\mathrm{Nd}/^{144}\mathrm{Nd})_0$ sirven para distinguir las rocas volcánicas procedentes del manto más recientes de las procedentes del reciclaje de corteza antigua. La firma isotópica media de la Tierra y la del manto empobrecido evolucionan con el tiempo de forma predeterminada; la de la corteza, en cambio, depende del tiempo que ésta ha pasado separada del manto. A causa de las diferencias en su relación Sm/Nd, con el tiempo, la firma isotópica de la corteza diverge cada vez más de la del manto empobrecido. Así pues, comparada con la corteza de formación reciente, la corteza más antigua presenta una mayor diferencia entre su $(^{143}\mathrm{Nd}/^{144}\mathrm{Nd})_0$ y la del manto empobrecido del que procede.

En términos absolutos, las diferencias en la relación ^{143}Nd/^{144}Nd de las rocas de la corteza y del manto son pequeñas. Por ello, los geólogos definen un parámetro, ε_{Nd}, que refleja la *diferencia* entre el valor de $(^{143}\mathrm{Nd}/^{144}\mathrm{Nd})_0$ en la muestra y el promedio terrestre en el momento de cristalización de la roca. Definido así, ε_{Nd} para el promedio terrestre es siempre cero. Puesto que ^{143}Nd/^{144}Nd aumenta más rápidamente en el manto empobrecido y más lentamente en la corteza que en el global de la Tierra, el manto empobrecido ha evolucionado, en el transcurso del tiempo geológico, hacia valores más positivos de ε_{Nd}, mientras que la corteza lo ha hecho hacia valores más negativos. La evolución isotópica de la corteza describe una línea de crecimiento. Dado que la relación Sm/Nd de las rocas de la corteza suele tomar valores próximos a 0,2, podemos predecir la pendiente de dicha línea, que aumenta la separación entre ésta y la del manto empobrecido.

Debido a tan divergentes líneas de crecimiento, ε_{Nd} puede utilizarse para distinguir entre las rocas procedentes del manto empobrecido y las procedentes de una corteza antigua. Es más, aunque la corteza se recicle mediante eventos orogénicos posteriores, su evolución isotópica deberá seguir la misma línea de crecimiento, puesto que dichos procesos apenas cambian la relación Sm/Nd.

En la práctica, los geólogos emplean este razonamiento a la inversa. A partir del valor actual de ^{143}Nd/^{144}Nd, escudriñan en el pasado geológico remoto. Para las rocas derivadas de la corteza, calculan y extrapolan hacia atrás la línea de crecimiento (el cambio en el tiempo del valor de ε_{Nd}) hasta que se cruza con la línea de crecimiento del manto empobrecido. El punto de intersección indica justo el momento en que la composición isotópica de la muestra coincidía con la del manto empobrecido del que procedía, es decir, el momento en el que la corteza original salió del manto. Este momento se conoce como la *edad modelo del manto empobrecido* (T_{ME}).

La mayor parte de la corteza proviene, de forma directa o indirecta, del manto empobrecido. Como consecuencia, el valor de ε_{Nd} *inicial* (ε_{Nd} de una roca en relación a ε_{Nd} del manto empobrecido en el momento de la cristalización) resulta crucial para el estudio de la tectónica. Por ejemplo, las rocas volcánicas con valores iniciales de ε_{Nd} similares a los del manto empobrecido deben proceder de la reserva del manto empobrecido en el momento de su formación; se trata, por ello, de rocas "juveniles". Por el contrario, se considera que las rocas volcánicas con valores de ε_{Nd} muy inferiores a los del manto empobrecido en el momento de su formación provienen de antigua corteza fundida. Para determinar el momento en que dicha corteza se separó del manto, basta con hallar la intersección de su línea de crecimiento con la del manto empobrecido.

Con todo, los valores de T_{ME} deben emplearse con suma cautela. En su camino ascendente hacia la superficie, los magmas pueden mezclarse con otros de distinto origen. Así, un gran número de muestras constituyen, en realidad, mezclas de antigua corteza reciclada y material juvenil procedente del manto. En estas circunstancias, T_{ME} carece de significado geológico. Por fortuna, contamos con otros indicadores químicos que detectan la presencia de dichas mezclas, de forma que las muestras contaminadas pueden descartarse.

más joven que el episodio de fragmentación del supercontinente. Por otra parte, el supercontinente está rodeado de un lecho oceánico *exterior*, formado *antes* que se produjera el evento de rifting. Conforme el océano interior se expande, el océano exterior se contrae mediante la subducción de su litosfera más antigua. Así, el contraste de edad entre los océanos, interior y exterior, resulta máximo justo tras la ruptura del supercontinente y disminuye a medida que los continentes se alejan entre sí.

Uno de los modelos sobre la formación de los supercontinentes considera que los océanos que se cierran son los interiores. De ser así, el próximo supercontinente se producirá por el cierre del océano Atlántico y la colisión entre Europa y Africa con Norteamérica y Sudamérica. El otro modelo, en cambio, apuesta por los océanos exteriores. Por tanto, estima que el próximo supercontinente se produ-

cirá por el cierre del océano Pacífico: Australia continuará en su movimiento de avance septentrional hacia Asia oriental, mientras que Norteamérica y Sudamérica seguirán su curso occidental hasta cerrar el Pacífico.

Propuesto por J. Tuzo Wilson, el primer modelo defiende que la subducción de la litosfera oceánica generada entre las masas continentales tras la ruptura y dispersión de un supercontinente constituye, en última instancia, el mecanismo que reúne los continentes para ensamblar un nuevo supercontinente. En un proceso de "tectónica del acordeón" (denominación que remite a su parecido con el movimiento de extensión y contracción del instrumento), el supercontinente "va hacia adentro" o "se introvierte". De esta forma, los márgenes continentales interiores (de cola) del supercontinente en separación se transforman en los cinturones orogénicos interiores del siguiente supercontinente. Encontramos un posible ejemplo de este fenómeno en la evolución del orógeno Apalachiano-Caledoniano-Varisco de Norteamérica y Europa: la subducción de la litosfera oceánica, originada por la ruptura de Pannotia hace unos 550 millones de años, culminó con las colisiones continente-continente asociadas a la formación de Pangea, alrededor de 250 millones de años después.

Por el contrario, el segundo modelo propone que, tras la ruptura de un supercontinente, las masas continentales en dispersión migran por el planeta hasta reunirse en el lado opuesto. El ascenso del calor del manto atrapado bajo el supercontinente provoca que éste se fragmente y que las masas continentales resultantes se dispersen hacia las antípodas. En este escenario, el supercontinente "va hacia fuera" o "se extravierte", de forma que los márgenes continentales exteriores del supercontinente en dispersión se transforman en los cinturones orogénicos interiores del futuro supercontinente.

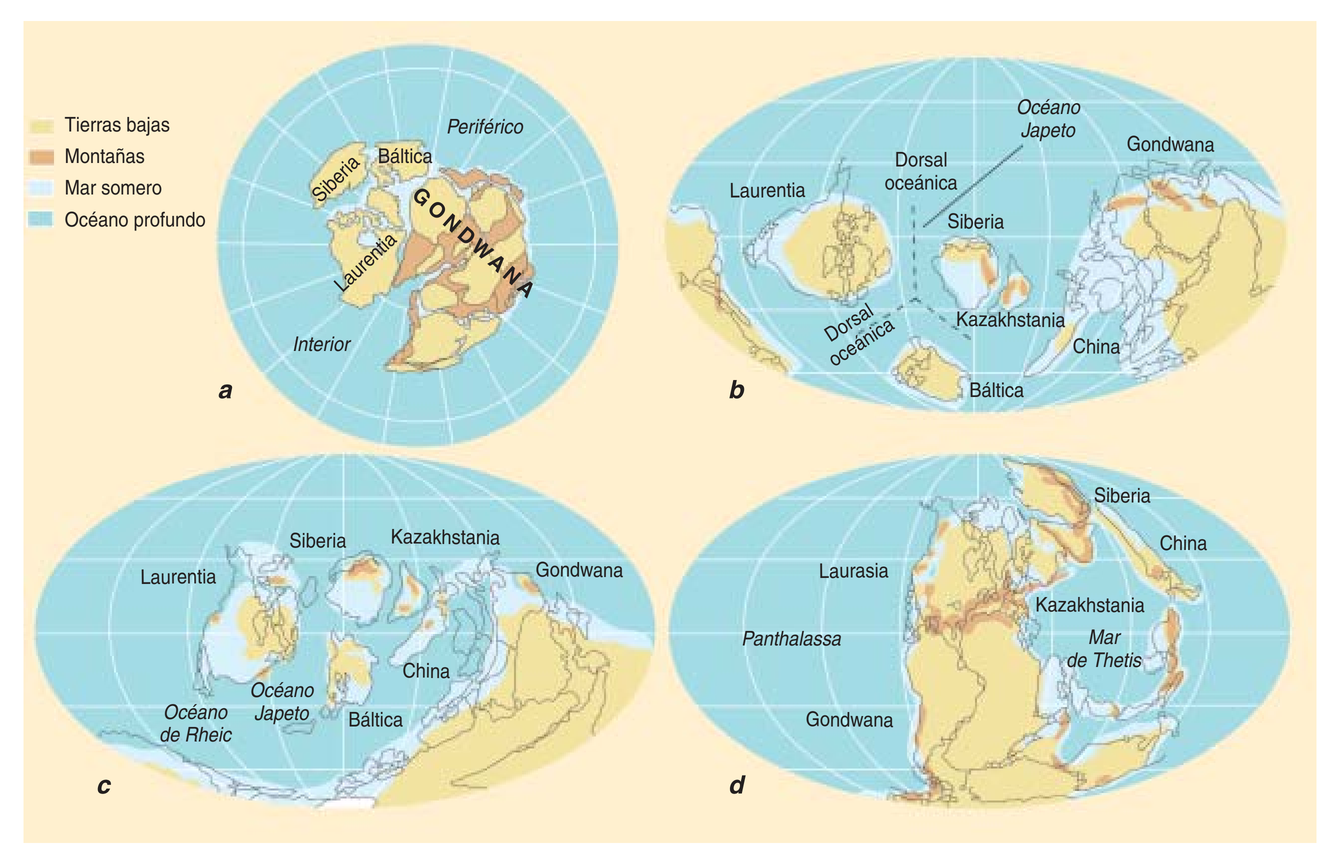
En 1991, Paul Hoffman, de la Universidad de Harvard, propuso que la ruptura del supercontinente Rodinia, hace unos 760 millones de años, causó la extraversión de Gondwana, una asociación antigua de los continentes meridionales. Según Hoffman, el océano Pacífico se formó por vez primera hace 760 millones de años, cuando la masa continental que integraba Australia y la Antártida se disgregó de la masa continental antecesora de Norteamérica. Mientras esta masa, que constituiría después Gondwana Oriental, se alejaba del punto de fractura, se hundió la antigua corteza oceánica que rodeaba Rodinia. La subducción continuó hasta que Gondwana Oriental colisionó con la masa unida de Africa y Sudamérica (Gondwana Occidental) y originó así, hace unos 600 millones años, el supercontinente Pannotia. A diferencia, pues, de la introversión, en la que los océanos interiores más jóvenes se cierran para dar lugar al siguiente supercontinente, en la extraversión se cierra el océano exterior para ensamblar los continentes en uno.

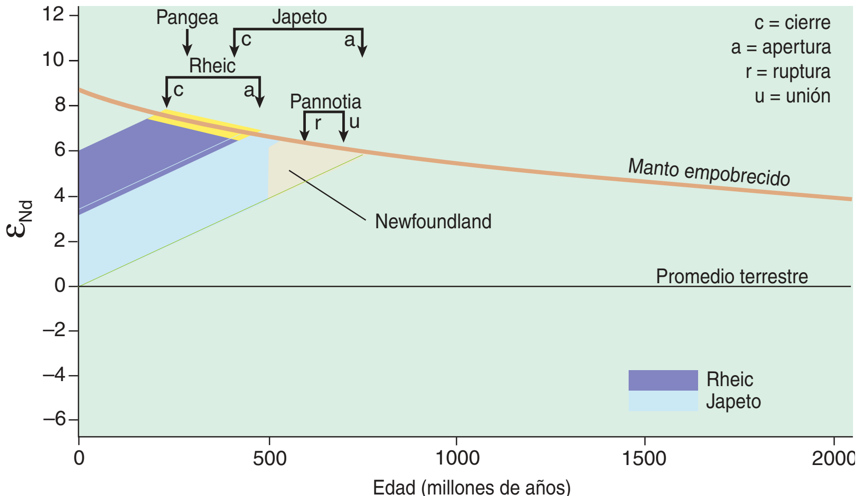
5. ESQUEMA DE LAS POSIBLES ETAPAS del ciclo supercontinental. El supercontinente está rodeado por un océano exterior con zonas de subducción y complejos volcánicos (*triángulos rojos*) que bordean sus márgenes (*a*). En el momento de la fisura (T_R), el resquebrajamiento del supercontinente crea un nuevo océano interior (*b*). En este estadio conviven dos tipos de océanos: el exterior, que rodea las masas continentales en dispersión y cuya litosfera oceánica tiene una edad de manto empobrecido (T_{ME}) superior a T_R, y el interior, formado por litosfera oceánica relativamente nueva con una T_{ME} inferior a T_R. Así pues, la edad de los fragmentos de litosfera oceánica que se agregan a los continentes cuando éstos se unen encierra la clave para identificar el mecanismo de ensamblaje. Si se cierra un océano interior, el siguiente supercontinente se forma por introversión (movimiento de acordeón), de forma que la litosfera oceánica acrecida será más joven que T_R (*c*). Si, por el contrario, se cierra un océano exterior, el supercontinente siguiente se formará por extraversión; la litosfera oceánica acrecida derivará del océano exterior y será más antigua que T_R (*d*).

Sigma Xi/American Scientist

Diferencias entre los dos modelos

La introversión y la extraversión ocupan los extremos de un amplio abanico de posibilidades. Los dos modelos divergen en cuestiones sustantivas y producen modos de ensamblaje supercontinental con peculiaridades geodinámicas dis-





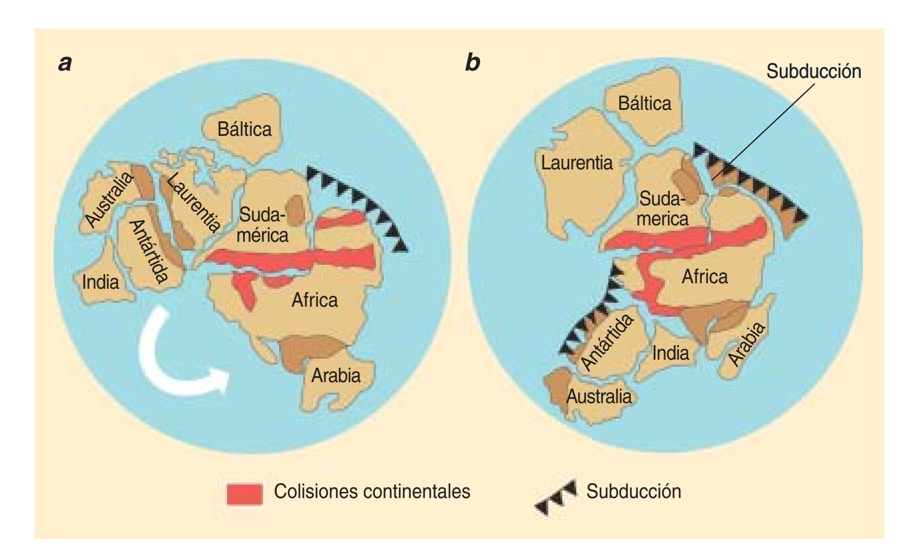
6. RECONSTRUCCIONES basadas en la composición isotópica de samario (Sm) y neodimio (Nd). Nos indican que Pangea se generó por introversión. La disgregación de Pannotia, hace alrededor de 550 millones de años, creó océanos interiores: el Japeto (*b*), hace unos 500 millones de años, y el Rheic (*c*), hace unos 440 millones de años. Corresponden éstos a los océanos que se consumieron para formar Pangea (*d*) hace unos 300 millones de años. El diagrama de relaciones iniciales de neodimio (ε_{Nd}) respecto del tiempo indica que la composición de los complejos oceánicos del Japeto y del Rheic en el orógeno Apalachiano-Caledoniano —de Newfoundland, por ejemplo— sugieren T_{ME} inferiores a T_R (momento de la ruptura) de Pannotia (en esta figura y en la figura 7 los resultados se obtuvieron tomando el valor típico de 0,18 para la relación de Sm/Nd en la corteza).

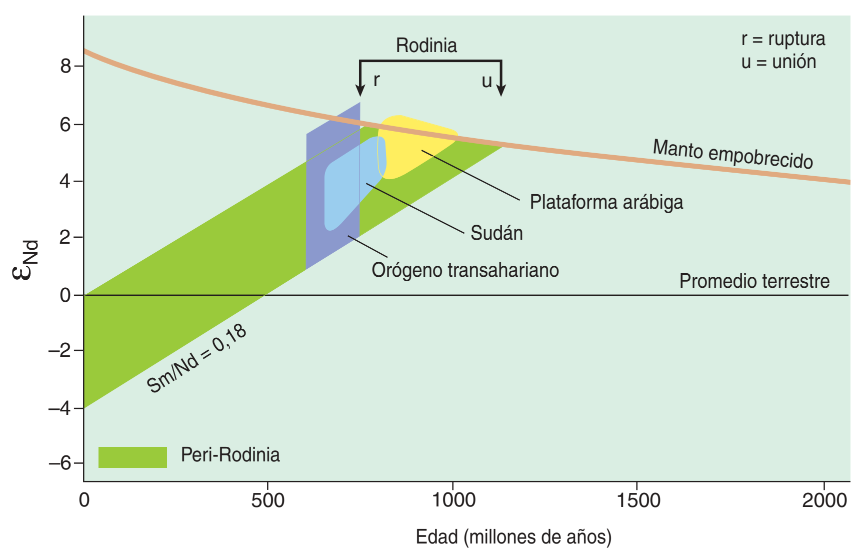
tintivas, que deberían reflejarse en el registro geológico.

La clave para establecer qué mecanismo geodinámico operaba en un determinado período geológico se halla en la edad de la litosfera oceánica subducida durante la formación del supercontinente. En el caso de la introversión, la formación de esa litosfera es posterior a la ruptura del supercontinente precedente, pero anterior al ensamblaje del supercontinente siguiente. Por el contrario, en la extraversión, la litosfera que primero subduce se habrá constituido antes de la disgregación del supercontinente precedente.

Para infortunio de los investigadores, la subducción de litosfera oceánica que acaba en una colisión continental suele destruir gran parte de las pruebas que nos permitirían distinguir entre los dos modelos. Sin embargo, en la mayoría de los orógenos hay pequeños fragmentos de la litosfera oceánica en subducción que se desprenden para unirse a los continentes en un proceso de *obducción*. A diferencia del sino del resto de la litosfera oceánica, éstos persisten en el registro geológico.

Asimismo, los complejos de islas volcánicas (*arcos insulares*) originados sobre las zonas de subducción, aunque ahora incluidos *en* la litosfera oceánica que subduce, pueden resultar decapitados, arrancados





7. DESPUES DE LA FRAGMENTACION DE RODINIA, hace unos 760 millones de años (*a*), el océano exterior se cerró para formar Pannotia (*b*). El diagrama de relaciones iniciales de neodimio (ε_{Nd}) respecto del tiempo indica la composición isotópica Sm-Nd de complejos oceánicos asociados al ensamblaje de Pannotia. Las edades de la litosfera oceánica que habría rodeado Rodinia se determinan a partir de los momentos de unión y ruptura de Rodinia. Estos complejos incluyen las provincias brasileñas de Borborema y Tocantins, el cinturón Transahariano del Africa Occidental y los orógenos del este y el oeste africanos. En cada caso, la evolución temporal de ε_{Nd} sitúa T_{ME} entre la formación y la ruptura de Rodinia, es decir, entre 1000 y 750 millones de años. Ello corresponde a un proceso de extraversión.

del suelo oceánico e incorporados al margen continental, pasando, también, a formar parte de la historia geológica. En el más sencillo de los casos, la edad de cristalización de estos complejos acrecidos revelaría si se formaron antes o después de que el supercontinente se fragmentara, así como si proceden de un océano interior o exterior. Puesto que la discrepancia de edad entre la litosfera de un océano interior y la de uno exterior resulta máxima justo después de la ruptura de un supercontinente y se acorta a medida que se van distanciando los continentes entre sí, la edad de cristalización de los primeros complejos en acrecer constituye el parámetro más apropiado para averiguar en qué océano se formaron.

En ambos modelos, sin embargo, la subducción que acontece durante el cierre de la cuenca oceánica puede generar nuevos arcos insulares volcánicos con una edad de cristalización posterior a la ruptura del supercontinente, sea cual sea el tipo de océano (interior o exterior) que se hunde. Asimismo, en el margen continental se generan por subducción arcos volcánicos con edades de cristalización posteriores al inicio de dicha subducción. En ninguno de estos dos casos la edad de cristalización sirve para distinguir entre las dos hipótesis que aquí nos ocupan. Para aquellos litosferoclastos volcánicos cuya evolución está marcada por la renovación de la litosfera oceánica, debemos recurrir a otro método de datación: un potente análisis isotópico que nos permite determinar la edad de la litosfera oceánica original.

Análisis isotópico

Los isótopos corresponden a átomos que, si bien pertenecen al mismo elemento químico, difieren ligeramente en su masa. Todos los átomos de un mismo elemento cuentan con el mismo número de protones en su núcleo. El número de neutrones —y con ellos la masa del átomo—, en cambio, puede variar; cada una de estas variaciones corresponde a un isótopo. Un gran número de elementos cuentan con varios isótopos. Algunos son radiactivos, es decir, su inestabilidad les induce a desintegrarse de forma espontánea para convertirse en isótopos más estables, emitiendo energía durante el proceso. El tiempo necesario para que la mitad del elemento "progenitor" (inestable) se desintegre y forme el elemento "hijo" (más estable), corresponde a la vida media del elemento radiactivo; toma un valor constante y puede medirse en el laboratorio. Puede determinarse también la relación entre ambos isótopos; combinada con la vida media del elemento, sirve para calcular el tiempo que la muestra viene desintegrándose. En el caso de una roca volcánica, ese tiempo corresponde a la edad de cristalización.

Además de resultar útiles para la datación geológica, algunos isótopos pueden también utilizarse como trazadores para obtener información acerca del material que originó una roca volcánica. El trabajo pionero de Don DePaolo, de la Universidad

de California en Berkeley, y otros ha puesto de manifiesto que la desintegración que transforma el samario (Sm) en neodimio (Nd) constituye uno de los mejores trazadores de los procesos tectónicos.

Aunque la transformación del Sm en Nd resulta un proceso complejo, podemos ilustrarlo con una comparación: la historia de los primeros inmigrantes europeos en Norteamérica. Los apellidos se han transmitido de generación en generación. Ello permite a los genealogistas remontarse en el tiempo y deducir, por ejemplo, la fecha en la que los antepasados abandonaron su país de origen. De forma parecida, si conocemos la edad de cristalización de una roca podemos trazar la evolución de los isótopos de Sm y Nd, y deducir cuándo el "antepasado químico" de la roca se separó del *manto empobrecido* —empobrecido porque las tierras raras ligeras, la familia a la que pertenecen el Sm y el Nd, se concentran en el líquido durante la fusión, reduciendo la cantidad de esos elementos en el manto.

El samario y el neodimio muestran un comportamiento químico muy similar; ello facilita que los procesos de renovación de la corteza apenas afecten a la relación de sus concentraciones, que se transmite de "generación en generación". Como veremos, la razón entre el momento en que los ancestros de una roca partieron del manto empobrecido —*edad del manto empobrecido* o T_{ME}— y el momento de ruptura de un supercontinente nos revela cómo se formó el siguiente supercontinente. A partir de un conjunto de muestras de roca podemos definir, en un gráfico de la evolución isotópica del neodimio, una envolvente que permite distinguir con claridad entre introversión y extraversión.

La litosfera oceánica que se consume durante la introversión procede del océano interior, formado *después* de la ruptura del anterior supercontinente; la litosfera oceánica que se destruye durante la extraversión, en cambio, procede del océano exterior, que, en algunos casos, se formó *antes* de la ruptura del supercontinente precedente. Combinando estas observaciones con la relación Sm/Nd característica de las rocas litosféricas se puede definir una envolvente de valores isotópicos esperados para cada uno de los dos tipos de océano. Este enfoque predice envolventes distintas para los océanos interiores y exteriores. [Se recurre al parámetro ε_{Nd} para designar la diferencia entre la relación de dos isótopos de neodimio en una muestra concreta y su valor promedio terrestre en el momento en que la roca cristalizó.] El análisis isotópico de la litosfera de estos océanos, o de los litosferoclastos volcánicos producto de su reciclaje, debería permitirnos distinguir entre los dos modelos que describen la congregación de un supercontinente.

La formación de Pangea

Los Apalaches en Norteamérica, el Cinturón Caledoniano del Atlántico norte, el Cinturón Varisco de Europa meridional y los montes Urales en Rusia constituyen los principales orógenos de colisión asociados al ensamblaje de Pangea. La disgregación del supercontinente que le precedió, Pannotia, se inició hace 550 millones de años; ello nos permite definir dos envolventes, una para cada tipo de océano, interior y exterior. Trazando la ascendencia de las rocas oceánicas desde dichos cinturones montañosos hasta el momento en que abandonaron el manto empobrecido, se obtienen líneas de crecimiento que, al coincidir con una de las envolventes, permiten distinguir con claridad si Pangea se ensambló por introversión o extraversión.

Si los litosferoclastos oceánicos acrecidos durante la formación de Pangea procedían del océano interior, debieron haberse originado en el manto hace menos de 550 millones de años. Aunque no se dispone todavía de la información isotópica del Nd de los Urales, en los otros orógenos existen varios terranes oceánicos con rocas cuyas líneas de crecimiento indican que proceden de un océano interior. Sus valores iniciales de ε_{Nd}, correspondientes al momento de cristalización, están muy cercanos a la línea del manto empobrecido, lo que implica que el magma abandonó el manto empobrecido aproximadamente en el momento de su formación. Ello indica que proceden de un océano interior.

Los Apalaches se formaron cuando el océano Japeto se cerró. Contienen litosferoclastos asociados al nacimiento y desaparición posterior de ese mar. En Quebec, rocas de 600 millones de años de antigüedad, procedentes de los terranes en cuestión, muestran valores iniciales de ε_{Nd} muy altos (de +6,9 a +10,0), próximos a la línea del manto empobrecido; ello hace pensar que proceden del manto empobrecido. La edad de estas rocas coincide con la ruptura del supercontinente anterior, Pannotia, lo que hace suponer que los litosferoclastos reflejan los primeros estadios de esa ruptura. De forma parecida, en Newfoundland, los litosferoclastos oceánicos, de unos 480 millones de años de antigüedad, se hundieron sobre la antigua Norteamérica al tiempo que se cerraba el océano Japeto. Sus valores iniciales de ε_{Nd} (de +5,6 a +7,7) coinciden con los del manto empobrecido hace 480 millones de años. Así pues, estos litosferoclastos derivaron del manto en un momento posterior a la fragmentación de Pannotia, por lo que pueden considerarse vestigios de un océano interior.

Los litosferoclastos oceánicos asociados a la apertura y el cierre de Japeto muestran, por tanto, una composición muy cercana a la del T_{ME} en el momento de su emplazamiento; su edad modelo casi coincide con la edad de cristalización, posterior a la ruptura de Pannotia. Estos datos, junto con la falta de complejos oceánicos anteriores a la escisión, indican que la litosfera oceánica fuente se generó en un océano interior.

El cinturón Varisco de Europa occidental se formó hace entre 320 y 285 millones de años, cuando se cerró el océano de Rheic. En Gran Bretaña, Francia y España se conservan litosferoclastos asociados a la fragmentación continental y a la posterior subducción de este océano. En el Macizo Central francés, por ejemplo, los basaltos que se generaron al inicio de la apertura de este océano, hace alrededor de 480 millones de años, muestran valores iniciales de ε_{Nd} (cerca de +6,8) similares a los del manto empobrecido coetáneo. En el centro de

Francia y el sudoeste de España se encuentran rocas basálticas de 360 a 350 millones de años de antigüedad, relacionadas con procesos de subducción, con valores iniciales de ε_{Nd} próximos a los valores del manto empobrecido (de +6,1 a +8,0 y de +7,9 a +9,2 respectivamente). En la península de Lizard, al sur de Gran Bretaña, se conserva un fragmento obducido de suelo oceánico de Rheic que también muestra valores de ε_{Nd} (de +9,0 a +11,8) típicos del manto empobrecido. Su edad de cristalización, posterior a la ruptura, se remonta a los 390 millones de años.

Lo mismo que en el caso del Japeto, la correspondencia de los valores de ε_{Nd} con los del manto empobrecido coetáneo, así como la casi coincidencia entre T_{ME} y la edad de cristalización de las rocas del océano de Rheic, indican que la litosfera oceánica que compone estos conjuntos se generó *después* de la división de Pannotia y, por tanto, proceden de un océano interior. De este haz de pruebas se deduce que Pangea se formó por introversión.

La formación de Pannotia

Pero, ¿todos los supercontinentes se han reunido por introversión? Para hallar una respuesta, centrémonos en los datos procedentes de los orógenos de colisión asociados al ensamblaje de Pannotia, hace 600 millones de años; esos orógenos incluyen el cinturón de Borborema, en Brasil, y los cinturones Transahariano y de Mozambique, en el norte y este de Africa. Se caracterizan por conservar litosferoclastos procedentes de océanos que se cerraron para formar Pannotia. Debido a que el anterior supercontinente, Rodinia, se fragmentó hace unos 760 millones de años, la edad de los terranes originados en el océano interior no debería superar los 760 millones de años, mientras que la de gran parte de los derivados del océano exterior debería hallarse entre los 760 y los 1100 millones de años, la vida aproximada de Rodinia.

En la provincia brasileña de los Tocantins, encontramos litosferoclastos procedentes de arcos insulares, con edades de cristalización de 950 a 850 millones de años y de 760 a 600 millones de años, que muestran valores iniciales de ε_{Nd} desde +0,2 a +6,9 y una T_{ME} entre 1200 y 900 millones de años. En el cinturón Transahariano, al sudoeste de Algeria y en el mediodía de Marruecos, los terranes de origen insular con valores iniciales de ε_{Nd} muy altos (de +1,0 a +5,0), indican T_{ME} comprendidas entre los 1200 y los 950 millones de años.

El Cinturón de Mozambique también contiene varios litosferoclastos de origen insular. En el extremo septentrional del mismo, en Sudán, las rocas basálticas de 800 millones de años de antigüedad muestran valores iniciales de ε_{Nd} muy altos (de +3,6 a +5,2) y T_{ME} comprendidas entre los 900 y los 800 millones de años. Al sur, rocas de 740 millones de años de antigüedad y valores iniciales de ε_{Nd} desde +2,9 a +3,4 ofrecen T_{ME} comprendidas entre los 980 y los 960 millones de años. Así pues, cada uno de estos orógenos contiene terranes oceánicos con T_{ME} anteriores a la ruptura de Rodinia, es decir, que superan los 760 millones de años. Ello indica que la litosfera oceánica que generó estos conjuntos se originó *antes* de la ruptura de Rodinia. El océano cuyo cierre registran estos orógenos formaba parte del océano exterior que rodeaba este supercontinente. Por tanto, a diferencia de la formación de Pangea, concluimos que Pannotia se constituyó por extraversión.

Conclusiones

Se acepta hoy que los supercontinentes se han congregado y disgregado repetidamente en el transcurso de los últimos 3000 millones de años. Al menos en este período, la historia geológica de la Tierra ha estado dominada por una tectónica de placas. La interacción entre las corrientes convectivas del manto terrestre y la litosfera suprayacente ha causado repetidas tandas de ensamblaje y fragmentación del supercontinente. El análisis actual muestra dos mecanismos posibles, harto distintos. Tras la ruptura de Rodinia, por ejemplo, parece ser que los continentes en dispersión migraron hacia regiones de hundimiento del manto —las zonas de subducción—, cuya ubicación influyó sobremanera en la formación y la localización de Pannotia.

El mecanismo de formación de Pangea, en cambio, no está tan claro. Puesto que los continentes convergieron, sabemos que la litosfera de los océanos interiores que se cerraron se hundió a un ritmo más rápido que el de su creación. Dado que la destrucción de litosfera oceánica se compensa, a escala global, mediante la formación de litosfera nueva, el cierre de los océanos interiores debió ir acompañado de la creación de litosfera en el océano exterior.

Pero, ¿fue la formación de nueva litosfera oceánica exterior la que empujó y congregó en uno los continentes? ¿Fue, acaso, la rápida subducción en el océano interior la que tiró de ellos y los acercó, permitiendo el ascenso del manto hacia el océano exterior? Los mecanismos responsables de la formación de Pangea son hoy tan escurridizos como lo eran cuando Alfred Wegener, padre del concepto de la deriva continental, propuso por primera vez la existencia de este supercontinente, hace ahora un siglo.

Los autores

J. Brendan Murphy, profesor de la Universidad de San Francisco Javier en Autigonish, se dedica a la investigación de la orogénesis y la relación entre la actividad tectónica y los procesos ígneos. **R. Damian Nance** enseña en la Universidad de Ohio. Comparte con Murphy su interés por la tectónica y los procesos geodinámicos a gran escala. Vienen trabajando juntos desde 1985.

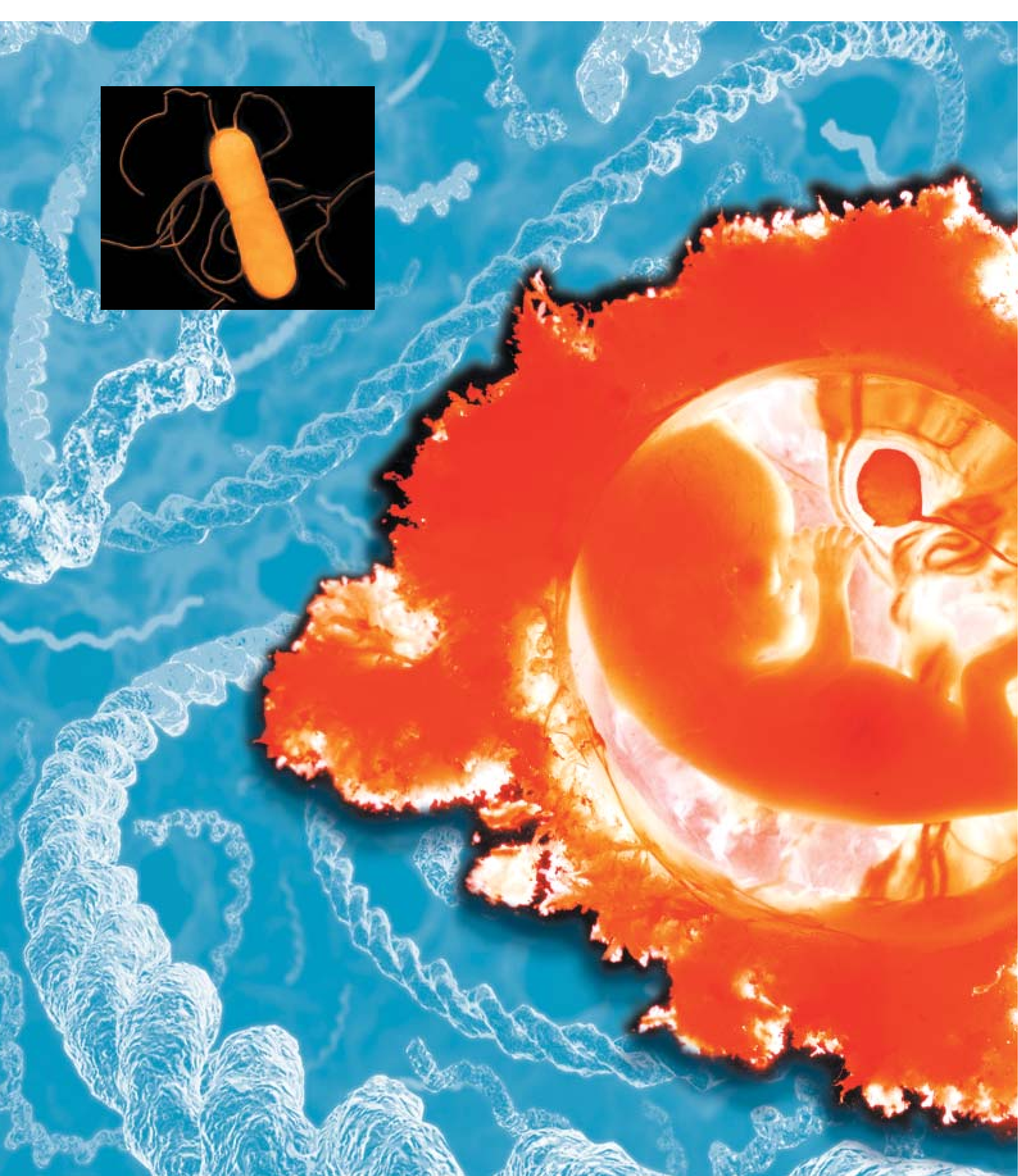
Bibliografía complementaria

LARGE-SCALE MANTLE CONVECTION AND THE AGGREGATION AND DISPERSAL OF SUPERCONTINENTS. M. Gurnis en *Nature*, vol. 322, págs. 695-699; 1988.

DID THE BREAKOUT OF LAURENTIA TURN GONDWANA INSIDE OUT? P. F. Hoffman en *Science*, vol. 252, págs. 1409-1412; 1991.

DO SUPERCONTINENTS INTROVERT OR EXTROVERT?: SM-ND ISOTOPIC EVIDENCE. J. B. Murphy y R. D. Nance en *Geology*, vol. 31, págs. 873-876; 2003.

LOS INTRONES



Se creía que en la regulación de los genes de los organismos complejos sólo intervenían proteínas. Sin embargo, un sistema regulador hasta ahora desconocido, basado en el ARN, podría encerrar las claves del desarrollo y la evolución

John S. Mattick



1. BACTERIAS Y HUMANOS difieren ampliamente en su complejidad estructural y de desarrollo. Sin embargo, durante largo tiempo se dio por descontado que todos los organismos se servían de idénticos mecanismos genéticos. Nuevos hallazgos apuntan que las claves de la complejidad podrían ocultarse en un material abundante en eucariotas, aunque escaso en procariotas: el ADN chatarra.

JEFF JOHNSON (*fondo de ADN*); MOREDUN ANIMAL HEALTH LTD/SCIENCE PHOTO LIBRARY (*bacteria*); LENNART NILSSON (*embrión*)

Lo que suele darse por supuesto, esa suerte de ideas acríticamente aceptadas, entrañan cierto peligro, sobre todo en ciencia. Empiezan siendo la interpretación más plausible y cómoda de los hechos, pero pueden llegar a convertirse en artículos de fe con los que las nuevas observaciones deben encajar; así ocurre cuando su veracidad no puede comprobarse de forma inmediata y sus deficiencias no resultan obvias. Ahora bien, si el volumen de información que contradice la ortodoxia se torna abrumador, ésta termina por cuartearse.

El proceso de información genética podría haber llegado a ese punto de inflexión. Desde hace medio siglo, el dogma central de la biología molecular reza así: la información genética, codificada en el ADN, se transcribe en forma de moléculas intermediarias de ARN, que a su vez se traducen en proteínas, o secuencias de aminoácidos. La fe dominante, encarnada en el aforismo “un gen, una proteína”, da por supuesta una sinonimia general entre genes y proteínas. A modo de corolario, se sostiene que las proteínas, amén de sus funciones estructurales y enzimáticas, constituyen los principales agentes reguladores de la actividad génica.

A esa conclusión se llegó a través de la investigación realizada con la bacteria *Escherichia coli* y otros procariotas (unicelulares carentes de núcleo). Y en sus grandes líneas sigue siendo cierta para los procariotas, cuyo ADN consta, casi exclusivamente, de genes que codifican proteínas, flanqueados por secuencias que regulan la expresión de los genes adyacentes. (También cuentan con un pequeño número de genes que cifran ARN con misión reguladora.)

Durante largo tiempo se ha dado por supuesto que las proteínas encierran y controlan toda la información en animales, plantas y hongos: eucariotas pluricelulares; en cuanto eucariotas, dotados de núcleo. Jacques Monod resumía así la universalidad del dogma central: “Lo que vale para *E. coli* vale también para el elefante”.

Monod llevaba razón, aunque sólo en parte. Una serie creciente de hallazgos nos revela ahora que ese *dictum* central resulta insuficiente para describir la biología molecular de los eucariotas. Las proteínas desempeñan, sin duda, una función notable en la regulación de la expresión génica en eucariotas, pero un sistema regulador paralelo, que se ignoraba, interviene en el proceso: consta de ARN y opera directamente sobre el ADN, ARN de diversos tipos y proteínas. Esta red de señalización de ARN, hasta ahora inadvertida, explicaría, por ejemplo, que la complejidad estructural de los humanos supere con creces la de cualquier organismo unicelular.

Algunos biólogos moleculares se mantienen escépticos o incluso contrarios ante estas ideas heterodoxas. Tal concepción novedosa podría, sin embargo, arrojar luz sobre viejos enigmas del desarrollo y la evolución, a la vez que abrir vías inéditas para la terapia génica. E incluso,

alumbrar métodos con capacidad para revolucionar la programación de sistemas cibernéticos y biológicos complejos.

"Chatarra" evolutiva

En 1977 se produjo cierto descubrimiento que dio la primera señal de la debilidad de la doctrina recibida sobre la programación genómica. Phillip A. Sharp, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Richard J. Roberts, de New England Biolabs, Inc., con sus respectivos equipos, demostraron, cada uno por su cuenta, que los genes de eucariotas no formaban bloques contiguos de secuencias codificadoras de proteínas, sino mosaicos de "exones" (secuencias de ADN que codifican fragmentos de proteínas) intercalados con "intrones" (secuencias intermedias de ADN, a menudo extensas, que no codifican proteínas). En el núcleo, los genes se transcriben en ARN; a continuación, el ARN intrónico se poda del transcrito primario y el ARN exónico se empalma para generar el ARN mensajero (ARNm); por fin, en el citoplasma, el ARNm se traduce en proteína. Durante largo tiempo, se ha supuesto que el ARN intrónico descartado, en apariencia inservible, entraba luego en un ciclo de degradación y reciclaje.

Pero si los intrones no codifican proteínas, entonces ¿por qué abundan en los eucariotas y escasean en los procariotas? Aunque constituyen el 95 por ciento o más del genoma humano, siempre se han considerado material redundante, "morralla" evolutiva; restos ancestrales de un tiempo anterior a la evolución de la vida, cuando fragmentos codificadores de proteínas se ensamblaron de forma tosca para constituir los primeros genes. Quizá los intrones sobrevivieron en los organismos complejos porque desempeñaban una función secundaria; por ejemplo, facilitar la reordenación de segmentos de proteína para crear nuevas y útiles combinaciones en el curso de la evolución. Con el mismo razonamiento se admitía que la ausencia de intrones en los procariotas obedecía a las intensas presiones competitivas del entorno microbiano; la evolución habría podado los intrones por inútiles.

Una observación propició el que los intrones —y otros ADN "intergénicos" en apariencia también redundantes— se considerasen "chatarra" evolutiva: la complejidad de los organismos no se correlaciona con el tamaño de su genoma. Hay anfibios que quintuplican la cantidad de ADN de los mamíferos; o lo que despierta mayor sorpresa, algunas amebas cuentan con 1000 veces más. Durante decenios, se dio por supuesto que tamaña complejidad mostraba mayor correlación con el número de genes codificadores de proteínas, si bien la relación se perdía debido a la presencia de un abigarrado fondo de intrones y otras secuencias morralla.

Tras la secuenciación del genoma de diversas especies, sabemos ya que tal correlación —entre la complejidad del organismo y el número de genes en el sentido tradicional tampoco existe. El nemátodo *Caenorhabditis elegans*, que consta sólo de unas 1000 células, porta unos 19.000 genes codificadores de proteínas, casi el 50 por ciento más que los insectos (13.500) y casi tantos como los humanos (alrededor de 25.000). Mayor coherencia presenta, por el contrario, la relación entre la complejidad del organismo y la cantidad de secuencias de ADN no codificadoras.

En resumen: la mayor parte del genoma humano se transcribe en ARN, pero sólo el 1,5 por ciento determina proteínas. ¿Qué inferir de ello? Pues que el genoma humano (y el de otros organismos complejos) está repleto de transcripción inútil o bien que esos ARN no codificadores cumplen alguna función desconocida.

Esta línea de argumentación, avalada por estudios experimentales, sugiere que, en los organismos complejos, muchos genes no codifican proteínas, pero sí originan ARN con funciones reguladoras. (Así acontecería en la mayoría de los mamíferos.) Según esta hipótesis, tales secuencias de ARN transmitirían información de suma importancia para el desarrollo y la evolución.

De parásitos a reguladores

Esta nueva interpretación de los intrones arroja luz sobre la función del ADN supuestamente redundante. Contrariamente a las anteriores propuestas, que remontaban el origen de los intrones a los albores de la vida, las pruebas compiladas en fecha reciente indican que estas secuencias invadieron el genoma de los organismos superiores avanzada la evolución. A buen seguro, derivarían de un elemento genético móvil, capaz de autoescindirse y autoempalmarse, similar a los intrones del grupo II; ahí se cobijan fragmentos de ADN parásito dotados de capacidad para autoinsertarse en genomas huésped y autoescindirse cuando se transcriben en ARN.

En las bacterias, los intrones del grupo II aparecen sólo de forma esporádica. Se entiende de inmediato. Al carecer de núcleo, en ellas la transcripción y la traducción corren parejas: el ARN se traduce en proteína casi a la misma velocidad que se va transcribiendo a partir del ADN. No hay margen temporal para que se escinda el ARN sin función codificadora; por tanto, un intrón inhabilitaría su gen huésped, con consecuencias harto perjudiciales para la bacteria. En eucariotas, la transcripción se realiza en el núcleo; la traducción, en el cito-

Resumen/Revisión del dogma genético

- Una fracción notable del ADN de los organismos complejos (eucariotas) no cifra la síntesis de proteínas. Por ese motivo se le había venido considerando "chatarra" evolutiva.
- De acuerdo con la investigación reciente, ese ADN redundante codifica un sistema regulador basado en ARN. La actividad génica podría, por tanto, operar en los eucariotas de una forma radicalmente distinta de la observada en los procariotas.
- Esta nueva teoría explicaría por qué la complejidad estructural y epigenética de los organismos no aumenta en paralelo con el número de genes codificadores de proteínas. Abre, además, nuevas vías para la investigación farmacológica y médica.

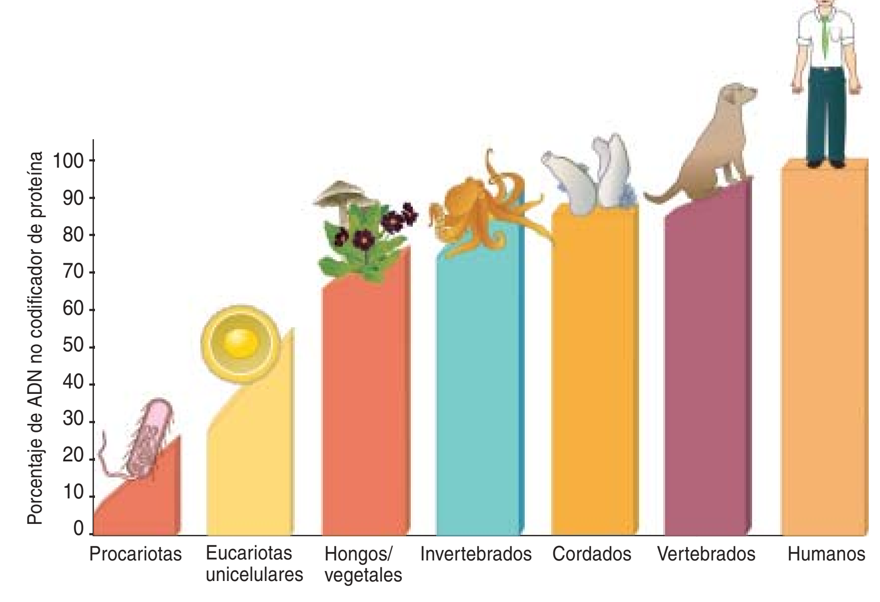
plasma. Tal separación permite la autoescisión del ARN intrónico. Por consiguiente, los eucariotas toleran mejor los intrones.

Mientras los intrones necesitaron autoescindirse y autoempalmarse, sus secuencias no se desviaron mucho de las de los intrones del grupo II. Pero las cosas cambiaron con la llegada, en los eucariotas, de los somites cirujanos ("splicesomes"), complejos de pequeños ARN catalíticos y numerosas proteínas que se dedica a podar el ARN intrónico de los precursores del ARN mensajero.

Al liberar a los intrones de la necesidad de autoescindirse, los somites cirujanos habrían favorecido que aquéllos proliferaran, experimentaran mutaciones y evolucionaran. La selección natural habría retenido las mutaciones intrónicas beneficiosas para el organismo huésped. Por tanto, el ARN intrónico podría haber evolucionado de forma independiente y paralela a las proteínas. En resumen, el advenimiento de los intrones podría haber iniciado, en los eucariotas, un explosivo episodio de evolución molecular, basado en el ARN, no en las proteínas. En lugar de convertirse en reliquias moleculares redundantes, los intrones habrían adquirido, poco a poco, funciones génicas mediadas por ARN.

Esta hipótesis evolutiva entraña consecuencias profundas para nuestra comprensión de la actividad génica. Los eucariotas pueden haber desarrollado un sistema operativo genético y unas redes de control harto más complejas que las de los procariotas: los ARN y las proteínas podrían comunicar, en paralelo, información reguladora. Tal disposición guardaría semejanza con los sistemas de procesamiento de la información que controlan las redes computacionales y cerebrales.

De las funciones celulares suelen ocuparse las proteínas, pues son las que ofrecen una amplia diversidad química y estructural. Sin embargo, el ARN cuenta con una ventaja sobre las proteínas para transmitir información y regular actividades en las que interviene el propio genoma: puede codificar señales, cortas y específicas, que operan a la manera de una cadena de bits o un código



2. LAS SECUENCIAS NO CODIFICADORAS DE PROTEINAS constituyen sólo una pequeña fracción del ADN de procariotas. En los eucariotas, la proporción de ADN no codificador aumenta con la complejidad del organismo. Tales secuencias se venían considerando redundantes. La verdad es que hemos de acudir a ellas para entender la complejidad biológica.

LUCY READING; FUENTE: R. J. TAFT Y J. S. MATTICK

postal. Tales marcas dirigen moléculas de ARN hacia dianas receptoras en otros ARN y en el ADN. A su vez, las interacciones ARN-ARN y ARN-ADN dan lugar a estructuras que reclutan proteínas para transformar las señales en acciones.

Lo mismo que la cadencia de bits que opera en nuestro ordenador, la secuencia de información direccional que encierra el ARN confiere al sistema una finísima precisión; no pecaríamos de exageración si afirmáramos que se trata de un sistema digital.

Existen indicios sólidos, aunque fragmentarios, de la existencia de tal sistema regulador basado en ARN. Ello hace pensar que un gran número de genes habría evolucionado sólo para expresar señales de ARN como reguladoras de orden superior en la red. En estudios recientes sobre la transcripción en mamíferos se han identificado miles de ARN no codificadores. De todos los ARN transcritos, la mitad al menos, y quizá más de tres cuartas partes, encajan en esta categoría.

De acuerdo con esta hipótesis, cabría esperar también que muchos de estos ARN se procesaran para formar microseñales que encauzan hacia distintas dianas de la red. En este contexto se han identificado cientos de "microARN" derivados de intrones y de ARN transcritos no codificadores de mayor tamaño en vegetales, animales y hongos. Un número notable de ellos controlan la temporización de procesos que ocurren durante el desarrollo: mantenimiento de las células madre, proliferación celular y apoptosis (muerte celular programada que remodela los tejidos), entre otros. A buen seguro, quedan todavía por descubrir más microARN.

Estas señales de ARN condicionarían la actividad génica mediante su interacción con otros ARN, ADN y proteínas. Por ejemplo, podrían informar a diversos genes sobre la transcripción concluida de una determinada secuencia codificadora de proteína y disparar, en consecuencia, una cascada de ajustes paralelos. Y lo que reviste mayor interés: tales señales de ARN operarían como un poderoso programa de control anticipativo (*feed-forward*), incrustado en el material genético que dirige la expresión génica. De confirmarse estas propuestas, quedarían resueltos algunos de los interrogantes que rodean a la diferenciación celular y el desarrollo de los organismos.

Regulación del desarrollo

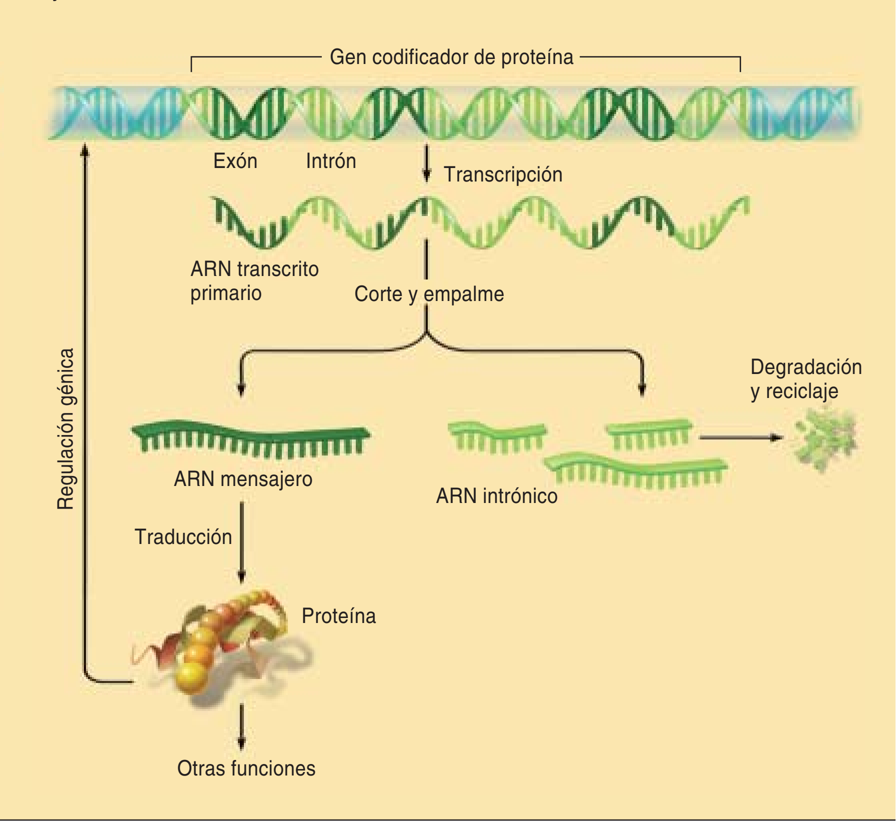
Recordemos qué ocurre durante el desarrollo embrionario humano: el ovocito fecundado progresa hasta

NUEVA CONCEPCION DE LA ACTIVIDAD GENICA

ACTIVIDAD GENICA DE LOS PROCARIOTAS
El ADN de los procariotas (bacterias y otras células sencillas) consta, casi exclusivamente, de genes codificadores de proteínas. Cuando esos genes entran en actividad, dan lugar a transcritos de ARN, que se traducen en proteínas; éstas, a su vez, se ocupan de regular la actividad génica y de otras funciones.

Gen codificador de proteína
Transcripción
ARN transcrito
Traducción
Proteína
Otras funciones
Regulación génica

VISION TRADICIONAL DE LA ACTIVIDAD GENICA DE LOS EUCARIOTAS
El ADN de los eucariotas (organismos complejos) consta de exones, secuencias que codifican segmentos de proteínas, separados por intrones, secuencias sin función codificadora. Cuando un gen está activo, se transcribe por completo en ARN; luego, el ARN intrónico se escinde del transcrito primario y el ARN exónico se ensambla para formar el ARN mensajero. Por fin, la célula procede a traducir el ARN mensajero en proteína, mientras degrada y recicla el ARN intrónico, redundante.



TERESE WINSLOW

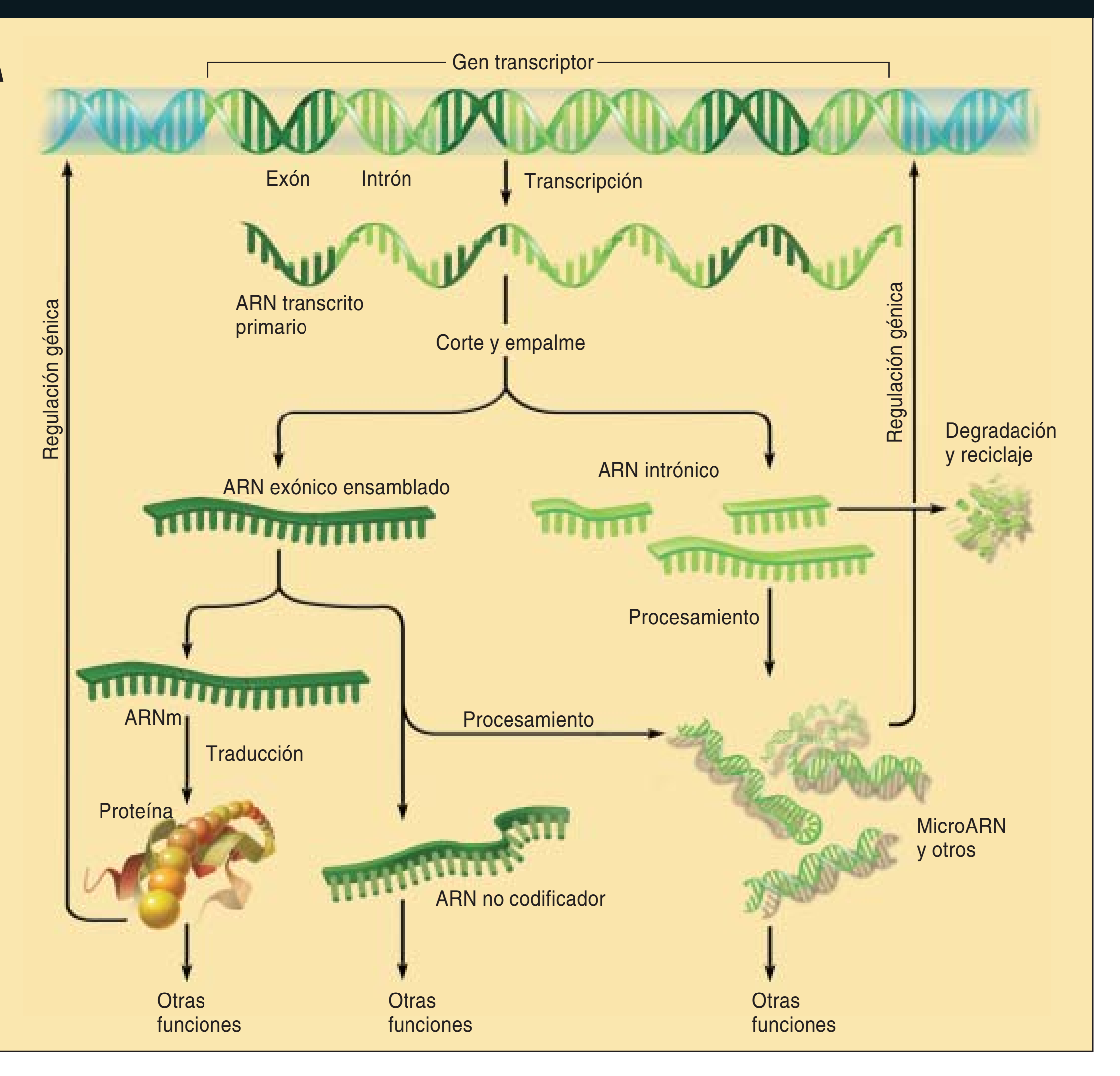
convertirse en un organismo completo, estructurado con una precisión exquisita, de 100 billones de células con localizaciones y funciones características. El patrón de expresión génica que hace posible esta transformación depende en gran medida de dos fenómenos: la modificación de la cromatina y el corte y empalme alternativo.

La cromatina, material que forma los cromosomas, consta de ADN ensamblado con proteínas. En el interior de las células, determinadas "etiquetas" químicas (grupos metilo y acetilo, por ejemplo) se unen a segmentos del ADN y a las proteínas de la cromatina, para establecer si un gen quedará accesible para la transcripción o bien permanecerá silente. A tenor de los resultados recientemente obtenidos, las señales de ARN dirigen el "etiquetado" de la cromatina y, por tanto, la expresión génica. Lo cierto es que varios procesos cromosómicos complejos, así la mitosis (división celular) y la meiosis (formación de los precursores del espermatozoide y el óvulo), amén de una cohorte de fenómenos genéticos dependen de vías bioquímicas que intervienen en la maduración del ARN.

La alternancia de las posibilidades de corte y empalme intrónico genera distintos repertorios de ARN y proteínas en las células de diferentes tejidos del organismo; todas, comparten, empero, un conjunto común de genes. La mayoría de los transcriptos codificadores de proteínas se ensamblan de forma alternativa en los mamíferos. Cuando el ARN intrónico se poda de un transcripto génico, las regiones de ARN codificadoras de proteína pueden ensamblarse de forma muy dispar para producir más de un tipo de proteína. Este fenómeno reviste suma importancia para el desarrollo de vegetales y animales, aunque se desconoce el mecanismo en cuya virtud la célula determina qué tipo de proteína debe sintetizarse. Se han descubierto algunos factores proteicos que controlan este proceso alternativo de corte y empalme. Por esa razón, se supone que es la combinación sutil de factores generales lo que activa o reprime el corte y empalme alternativo en diferentes contextos. Pero no existen datos suficientes que lo avalen.

Otra posibilidad, más probable y atractiva (desde un punto de vista mecánico), estriba en lo siguiente: compete a los ARN la regulación directa del proceso. En principio, estas moléculas podrían ejercer un con-

VISION ACTUAL DE LA ACTIVIDAD GENICA DE LOS EUCARIOTAS
Parte del ARN intrónico, e incluso parte del exónico ensamblado, podrían desempeñar una función reguladora mediante su interacción con el ADN, otras moléculas de ARN o proteínas. Modificando la producción de proteína, estos ARN no codificadores podrían controlar la actividad génica.



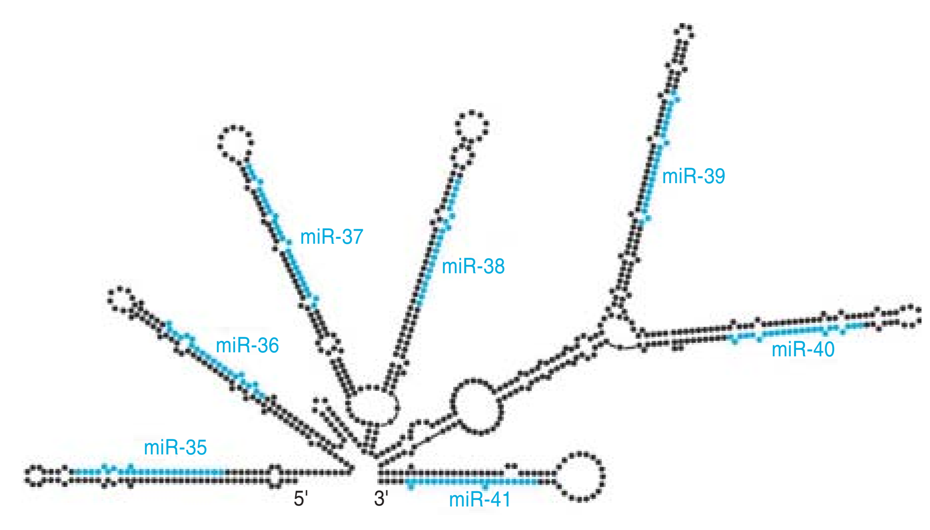
trol exquisito y flexible. Marcarían o se apropiarían de determinadas secuencias en los transcritos primarios de genes y luego dirigirían la unión de las piezas, a cargo de somites cirujanos. Dos hechos respaldan esta hipótesis. Por un lado, las secuencias de ADN en las uniones intrón-exón donde se produce el corte y empalme alternativo oponen a menudo resistencia a los cambios que se presentan en el curso de la evolución. Por otro, diversos laboratorios han demostrado que los ARN antisentido artificiales, diseñados para unirse a tales sitios, modifican los patrones de corte y empalme no sólo en cultivos celulares, sino también en organismos desarrollados. Aunque todavía no se ha detectado, resulta del todo plausible pensar que este fenómeno ocurra de forma natural, incluso *in vivo*.

Regulación de la complejidad

Cuanto llevamos expuesto nos conduce a una reflexión más general sobre el tipo de información, y la cuantía de la misma, que se requieren para programar el desarrollo de un organismo complejo. Para crear objetos complejos, sean casas o caballos, precisamos dos clases de instrucciones: una atañe a los componentes y, la otra, al sistema que guía su ensamblaje. (Para construir una casa, por ejemplo, deben especificarse qué y cuántos ladrillos, tableros y vigas se necesitan, pero también resulta imprescindible un proyecto arquitectónico que indique la distribución de dichos componentes.) En biología, y en eso se distingue de la arquitectura, ambos tipos de información están codificados en un mismo programa, a saber, el ADN.

Las moléculas de que constan los diferentes organismos son fundamentalmente las mismas: cerca del 99 por ciento de las proteínas humanas cuentan con proteínas homólogas en ratones, y viceversa. Muchas de estas moléculas se han conservado también en otros animales; las implicadas en procesos celulares básicos persisten en todos los eucariotas. De ello se infiere que la diversidad morfológica entre especies se debe, con toda probabilidad, a sus diferentes planos arquitectónicos.

La información que atañe a los componentes del organismo se halla en los genes codificadores de proteínas. Pero, ¿dónde reside la información arquitectónica? Se ha venido dando por supuesto que las "instrucciones de montaje" de los organismos complejos se hallan ins-



3. PRECURSOR HIPOTETICO de los microARN: un ARN transcrito primario que produce múltiples ARN de tamaño reducido (*azul*); su estructura podría dirigir la escisión de estas señales de ARN.

critas en las diversas combinaciones de factores reguladores del interior de las células; es decir, en las permutaciones de proteínas reguladoras que interactúan entre sí y con el ADN y ARN. Sin embargo, según ha observado Daniel C. Dennett, de la Universidad de Tufts, la inmensa mayoría de las casi infinitas posibilidades que podría generar esta combinatoria resultan caóticas y carentes de sentido. Lo que no deja de poner en aprieto a la biología, pues un organismo debe seguir, a través de su evolución y desarrollo, pautas razonables y competitivas; de lo contrario, muere. Generar complejidad resulta fácil; no así controlarla, dado que esto último requiere una cantidad ingente de información reguladora.

Por intuición y por razonamiento matemático, aceptamos que la cantidad de regulación necesaria aumenta de acuerdo con una función no lineal (cuadrática, casi siempre) del número de genes. Por tanto, conforme el sistema aumenta su complejidad, una proporción creciente del mismo debe dedicarse a la regulación. Esta relación no lineal entre regulación y función constituye, así parece, una propiedad característica de todos los sistemas dotados de una organización integradora. Por consiguiente, el crecimiento acelerado de la arquitectura de control impone un límite de complejidad intrínseco, que no puede superarse sin un cambio fundamental del mecanismo regulador.

Una observación respalda esta hipótesis: el número de reguladores proteicos en procariotas aumenta cuadráticamente con el tamaño del genoma. Asimismo, el punto en el cual se predice (mediante extrapolación) que el número de nuevos reguladores excede el número de nuevos genes funcionales se encuentra próximo al límite superior del tamaño del genoma bacteriano.

Por tanto, en el transcurso de la evolución, la complejidad de los procariotas puede haberse visto limitada por un incremento de la regulación génica, más que por factores ambientales o bioquímicos como se suele suponer. Esta hipótesis también encaja con el hecho de que la mayor parte de la historia de la vida en nuestro planeta consistió exclusivamente en microorganismos. Para superar ese límite de complejidad no bastaba con recurrir a la combinatoria de las interacciones proteicas.

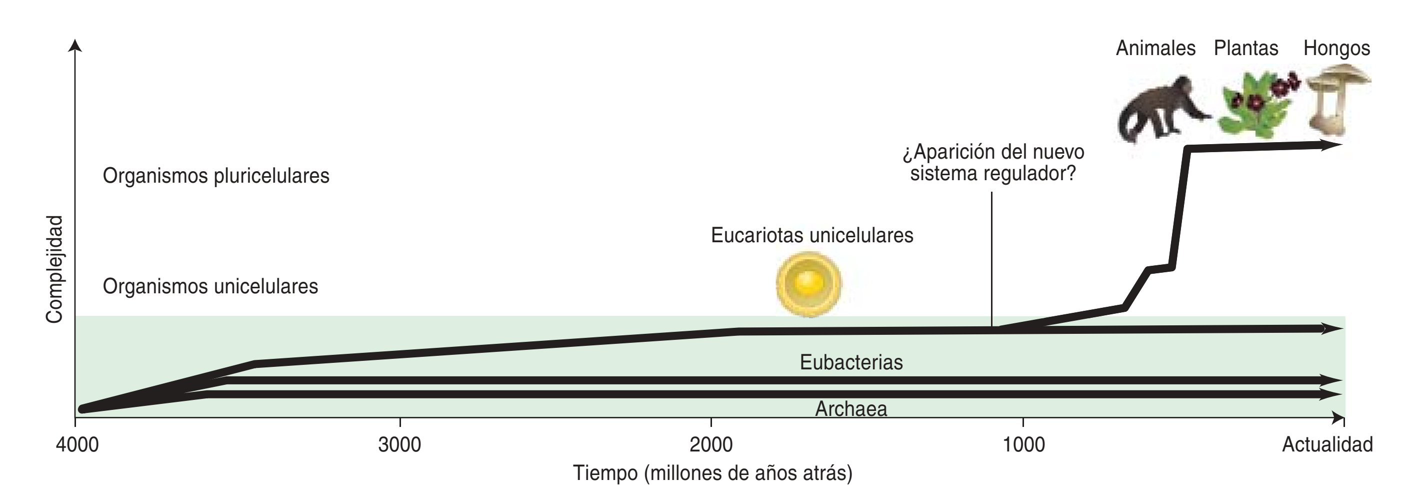
Sin embargo, con los eucariotas se halló una solución del problema. Los datos disponibles sugieren que el apogeo de los organismos pluricelulares durante los últimos 1000 millones de años fue consecuencia de la transición hacia una nueva arquitectura de control basada en señales de ARN digitales y endógenas. Ello explicaría la explosión del Cámbrico, que aconteció hace unos 525 millones de años, cuando una asombrosa diversidad de invertebrados evolucionó, al parecer bruscamente, a partir de formas de vida harto más simples. Estos resultados se expresan en una regla general cuya relevancia trasciende la biología: la complejidad organizada constituye una función de la información reguladora; en este sentido, según apuntaron Marie E. Csete, hoy en la facultad de medicina de la Universidad de Emory, y John C. Doyle, del Instituto de Tecnología de California, las explosiones de complejidad hallan sus causas en la acción de controles avanzados y redes incrustadas.

De esta regla derivan consecuencias sorprendentes. La mayor parte del genoma de los organismos complejos no constituye basura en absoluto; antes bien, resulta funcional y está sujeta a selección evolutiva. Quizá nos hayamos estado equivocando en la interpretación de la naturaleza de la programación génica y en la explicación de la base de las variaciones, en punto a caracteres, observadas entre individuos y especies.

Con todo, el hallazgo de nuestros días que reviste mayor alcance radica en la comprobación de que el genoma de vertebrados contiene miles de secuencias no codificadoras que han permanecido casi inalteradas durante varios millones de años; su grado de conservación es mayor que el de las que codifican proteínas. Nadie podía imaginarlo. Se desconoce el mecanismo que ha congelado tales secuencias, pero su persistencia sugiere que forman parte de redes complejas, esenciales para nuestra biología. Por tanto, el genoma humano y el de otros organismos complejos debería considerarse no ya un oasis de secuencias codificadoras en medio de un desierto de material redundante, sino un conjunto de islas de información acerca de los componentes proteicos en un mar de información reguladora, basada en el ARN.

La existencia de este nuevo sistema regulador abriría nuevas vías para el desarrollo de fármacos y la exploración genética. La fibrosis quística, la talasemia y otras enfermedades genéticas hallan su origen en la disfunción catastrófica de un componente: no funciona, simplemente, una proteína del paciente. Sin embargo, un buen número de las variaciones génicas que deter-

ALICE CHEN; DE NELSON C. LAU ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 294; 26 DE OCTUBRE DE 2001



4. LA VIDA UNICELULAR, procariota principalmente, dominó la Tierra durante miles de millones de años. Cuando apareció la vida pluricelular, sin embargo, la complejidad aumentó de forma espectacular. La aparición de un nuevo sistema regulador génico podría explicar el salto a la organización multicelular, así como la rápida diversificación biológica.

minan la susceptibilidad a trastornos y las que subyacen a nuestra idiosincrasia individual residen, probablemente, en la arquitectura reguladora del genoma no codificador, que controla el crecimiento y el desarrollo. (Los ARN sin función codificadora se han relacionado con varios trastornos, incluidos el linfoma de células B, el cáncer de pulmón, el cáncer de próstata, el autismo y la esquizofrenia.)

No resultará tarea fácil identificar defectos génicos mediante epidemiología genética molecular. Tampoco, corregirlos. Sin embargo, comprender el mecanismo del sistema regulador pudiera hacerse imprescindible para explicar nuestra individualidad física y psicológica, así como la variabilidad de caracteres en los vegetales y en los animales. Tal vez constituyan el preludio para idear nuevas estrategias terapéuticas y pergeñar manipulaciones genéticas en otras especies.

Los intrones no son los únicos componentes de la "chatarra" génica. Hemos de agregar los transposones y otros elementos repetitivos, que en conjunto dan cuenta del 40 por ciento del genoma humano. Se trata de secuencias reputadas hasta ahora parásitos moleculares; lo mismo que los intrones, colonizarían nuestro genoma en diferentes oleadas de la historia evolutiva.

Se han obtenido indicios sólidos, aunque dispersos, de que los transposones contribuirían a la evolución y regulación génica de los organismos superiores y desarrollarían un papel clave en la herencia epigenética (la modificación de los caracteres genéticos). Erev Y. Levanon, de Compugen, y otros, adscritos a distintas instituciones, acaban de anunciar un descubrimiento muy sugestivo: el proceso de corrección A-por-I; vale decir, el cambio de adenosina por inosina en un lugar muy específico de la secuencia de ARN. Demostraron que la sustitución de A-por-I en los ARN transcritos ocurre en humanos con mayor frecuencia (dos órdenes de magnitud) de lo que se pensaba y, de forma abrumadora, en los elementos Alu (secuencias repetidas que residen en ARN no codificadores). Particularmente activo en el cerebro, este proceso de corrección aberrante se ha asociado con la epilepsia, la depresión y otros trastornos de la conducta.

Si bien la corrección del ARN se produce, hasta cierto punto, en todos los animales, los elementos Alu son exclusivos de los primates. Ello sugiere la posibilidad de que, al colonizar el linaje de los primates, los elementos Alu hicieran posible la aparición de un nuevo nivel de complejidad en la maduración del ARN, permitiendo así que la programación del circuito neural ganara en dinamismo y flexibilidad. Tamaña versatilidad pudo, a su vez, servir de base para la emergencia de la memoria y otras facultades superiores de la especie humana.

Por último, el desentrañamiento del mecanismo de operación de esta compleja arquitectura reguladora del genoma de los organismos complejos puede arrojar luz sobre el diseño de sistemas capaces de autoreproducirse y autoprogramarse; en otras palabras, vida e inteligencia artificiales. Lo que se había considerado basura, por ignorar su razón de ser, podría encerrar los secretos de la complejidad humana y las claves de la programación de sistemas complejos en general.

El autor

John S. Mattick enseña biología molecular en la Universidad de Queensland. A él se debe la creación de la primera vacuna obtenida por ingeniería genética en Australia.

Bibliografía complementaria

DARWIN'S DANGEROUS IDEA. Daniel C. Dennett. Simon & Schuster, 1995.

CHALLENGING THE DOGMA: THE HIDDEN LAYER OF NON-PROTEIN-CODING RNAS IN COMPLEX ORGANISMS. John S. Mattick en *BioEssays*, vol. 25, n.º 10, págs. 930–939; octubre, 2003.

NONCODING RNAS: MOLECULAR BIOLOGY AND MOLECULAR MEDICINE. Dirigido por J. Barciszewski y V. A. Erdmann. Landes Bioscience/Eurekah.com, Georgetown Tex., 2003.

LUCY READING

Obesidad

Base genética

En la sociedad urbana de nuestros días, la obesidad constituye uno de los principales problemas de salud pública, debido al impacto que tiene en la calidad de vida de los individuos afectados. Se considera obesa la persona que presenta un índice de masa corporal (IMC) de 30 kg/m^2 o más.

La obesidad, un trastorno complejo, resulta de la interacción entre factores psicológicos, genéticos, metabólicos y ambientales. Desde hace varios años, los investigadores se han empeñado en la búsqueda de los genes causantes de la obesidad, a partir de las proteínas determinadas por ellos: leptinas y receptores cerebrales, asociados con la manifestación de ciertas conductas.

Mas apenas si se han explorado los patrones de comportamiento que llevan a una ingesta excesiva con resultado de obesidad. Nos enseña la epidemiología que en las personas obesas coincide una elevada frecuencia de trastornos de ansiedad, depresión, esquizofrenia y alteraciones de la personalidad. En este contexto, el grupo de Michael Devlin, del Instituto Psiquiátrico de Nueva York, sugiere que algunos pacientes psiquiátricos comen en exceso en respuesta a estados emocionales negativos o en razón de ciertas alteraciones congénitas de su personalidad (compulsividad, impulsividad y trastornos neuróticos).

En algunos trabajos se ha avanzado hacia la determinación de bases comunes entre genes del metabolismo y de la conducta. Ante la estrecha vinculación demostrada entre la leptina y el peso corporal, se ha sugerido la posibilidad de que la obesidad se debiera a mutaciones o variaciones alélicas del gen *OB*, codificador de dicha proteína. Tras analizar una región cercana a este gen, se observó también que existía una asociación significativa entre una variante y mujeres obesas que presentaban ansiedad y depresión. Pero los trastornos psiquiátricos no eran secundarios a la presencia de obesidad. Con otras palabras: la unión de la leptina a su receptor OB podría activar un neurotransmisor o neuropéptido, que ejercería un efecto directo sobre la conducta.

Otras líneas de investigación han abonado la idea que defiende la presencia de una probable disfunción en neurotransmisores cerebrales agentes de obesidad y partícipes también en la génesis de los trastornos mentales. El estudio se ha centrado en genes de receptores, proteínas y enzimas que intervienen en los sistemas de neurotransmisión de la dopamina y la serotonina.

Adviértase que muchos de los tratamientos indicados para reducir el apetito actúan en el sistema de serotonina. Con todo, el rastreo de los genes de receptores serotoninérgicos estudiados hasta la fecha no permite establecer ninguna asociación entre la obesidad y variante génica alguna. Sí parece que las mujeres portadoras de la forma larga del gen corren un riesgo mayor de presentar una conducta impulsiva hacia la ingesta excesiva.

En un estudio realizado en Finlandia, hace unos años, entre una muestra de 188 pares de hermanos obesos, se aportaron pruebas de la implicación del cromosoma X en el desarrollo de obesidad, con una mayor incidencia de obesidad en mujeres que en hombres. Por consiguiente, los genes situados dentro de esta región del X merecen, pues, detenida consideración.

En el cromosoma X se alojan los genes de dos enzimas que intervienen en la degradación de la dopamina y la serotonina, la monoaminooxidasa tipo A y tipo B (MAO-A y MAO-B). El gen de la MAO-A es un marcador genético que reviste particular importancia en diversos trastornos psiquiátricos.

En otro estudio familiar reciente, con pacientes obesos, se puso de manifiesto una mayor transmisión del alelo asociado con una actividad enzimática baja en sujetos que presentaban un IMC ≥ 35 kg/m^2. Este hallazgo concuerda con la investigación clínica en la siguiente observación: el uso de fármacos que inhiben la MAO provocan, a veces, aumento de peso.

El éxito en la búsqueda de los genes de la obesidad dependerá de la identificación de subtipos de la enfermedad que nos proporcionen grupos más homogéneos.

BEATRIZ CAMARENA MEDELLÍN
Depto. Genética Psiquiátrica,
Instituto Nacional de Psiquiatría
Ramón de la Fuente, México, D.F.,
México



Pintura de Botero que ilustra a una familia en que el fenotipo de obesidad se transmite de los padres a los hijos.

La limpieza de la piedra

El láser Nd:YAG

Desde los años setenta, se viene recurriendo a la técnica láser para proteger y conservar la piedra de monumentos y edificios históricos. Aplicada principalmente a la limpieza de rocas carbonatadas (calizas y mármoles), se emplea también, aunque en menor medida, en rocas sedimentarias silicatadas, como las areniscas. El láser elimina la costra negra producida por la contaminación atmosférica.

Si lo comparamos con otros métodos de limpieza, el láser presenta numerosas ventajas. Es muy adecuado para superficies sumamente frágiles o poco cohesionadas, pues no entra en contacto directo con la piedra. Se elimina la suciedad sin introducir materia ni generar productos secundarios. Es muy útil para trabajos que requieran una precisión muy fina, ya que sólo se limpia la parte en la que incide el haz fotónico. Su acción, selectiva, extrae la pátina sucia sin afectar a la roca. Puede dirigirse y controlarse en todo momento su operación.

En la limpieza de la piedra monumental se emplean láseres de medio activo sólido. (Llámase medio activo a la parte del equipo donde se genera la radiación.) El más utilizado, el láser Nd:YAG "Q-switched", lleva como medio activo una varilla de cristal de granate con itrio y aluminio (YAG), dopado con neodimio (Nd). [La expresión "Q-switched", o "con conmutación del factor de calidad", se refiere a su modo de funcionamiento: la disipación de luz en la cavidad resonante donde se genera el haz láser se reduce súbitamente (o, en otras palabras, se aumenta su "factor de calidad Q"), para generar pulsos cortos e intensos de luz.]

Emite en una longitud de onda fundamental de 1064 nanómetros, que cae dentro del infrarrojo cercano; genera pulsos que sólo duran nanosegundos. Produce la fotoablación, o eliminación de la capa sucia, mediante procesos fototérmicos, es decir, por calentamiento de la superficie absorbente de la radiación.

Muchos componentes de las capas de suciedad absorben intensamente la radiación infrarroja, mientras que los sustratos sólo lo hacen débilmente; ahí reside la razón principal de recurrir a ese láser de neodimio para la limpieza. Existe una gran diferencia de absorción entre una costra negra (90 %) y una superficie pétrea limpia (la calcita absorbe el 20 %). Para la radiación ultravioleta, es menor la diferencia de absorción entre la capa de suciedad y el sustrato limpio. El proceso, en principio selectivo, se interrumpe cuando se extrae la capa sucia. Los pulsos subsiguientes se reflejan y se evitan así daños a la piedra. Gracias a ese proceso, además, se conserva la pátina de envejecimiento, que suele perderse cuando se aplican otras longitudes de onda.

Sin embargo, la limpieza por láser no se halla exenta de riesgos. Podemos dañar el sustrato con una exposición excesiva a la radiación; es decir, cuando se sobrepasa un límite de fluencia o densidad de energía. (Llámase densidad a la razón entre energía del pulso y superficie impactada.). El umbral de daño o de fotoablación dependerá de tres factores: tipo de material (composición, textura y cristalinidad), parámetros del láser (fluencia y frecuencia del pulso, a una determinada longitud de onda y duración del pulso) y clase de aplicación (la irradiación sobre superficies húmedas reduce la probabilidad de daño y aumenta la eficiencia de la limpieza).

El óxido de hierro y los minerales ricos en hierro, pensemos en las micas, absorben mucho la radiación en la longitud de onda de 1064 nanómetros. Por tanto, si empleamos un láser Nd:YAG "Q-switched", que emite a esa longitud de onda, para la limpieza del granito, areniscas y calizas rojas, habrá que proceder con precaución para evitar que la radiación altere o disgregue el mineral. En superficies secas, se observa un cambio de color, una decoloración por lo común; atribuida a cambios en los estados de oxidación del hierro, la decoloración puede llegar a ser muy notable, en particular si se trata de rocas saturadas en el componente rojo. Algunos minerales, como las biotitas, pueden sufrir fusiones y vitrificaciones.

En mármoles y calizas de color claro la intervención del láser provoca a menudo el fenómeno del amarilleamiento, cuya naturaleza es objeto de debate. Para ciertos autores, deberíase a la conservación de la pátina de envejecimiento (yeso, oxalato u otros recubrimientos). En opi-

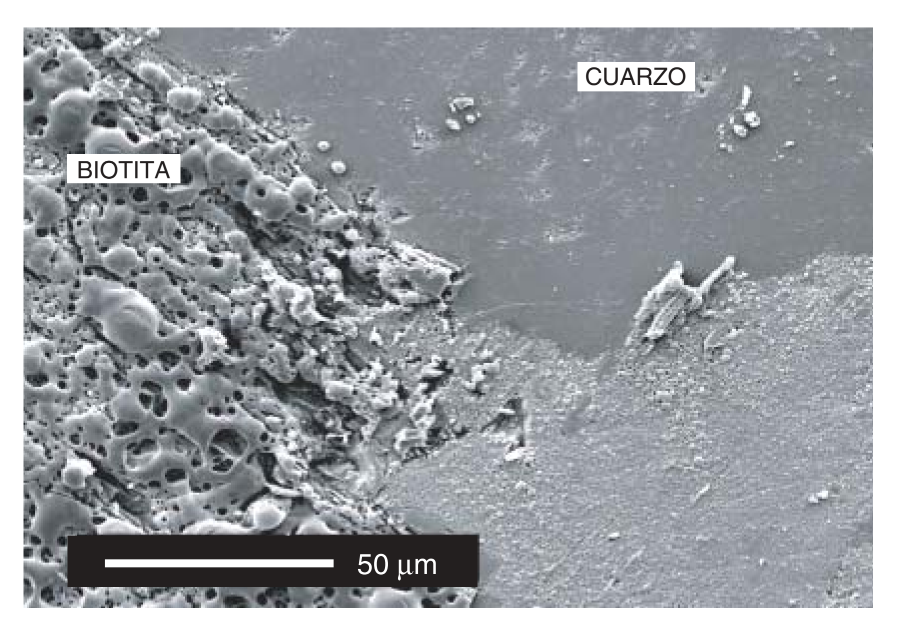


Imagen de microscopía electrónica de barrido que muestra el deterioro de la biotita de un granito por una sobreexposición a una radiación láser con un valor de fluencia por encima del umbral de daño.

nión de otros, nos hallaríamos ante el resultado de un daño infligido en el material, bien por una tinción de residuos orgánicos de suciedad de costras negras eliminadas con láser, o bien por una decoloración consecuente a los cambios térmicos en los compuestos de hierro de la piedra. Hay, por fin, quien atribuye el amarilleamiento a la dispersión de la luz debida a la creación de vacíos en la capa de yeso por la vaporización selectiva de las partículas negras. El amarilleamiento no se produce cuando se usan longitudes de onda de los espectros visible y ultravioleta.

Ese láser de neodimio de la longitud de onda indicada no resulta idóneo tampoco para eliminar determinados restos orgánicos o limpiar sobre ciertos pigmentos. No obstante las ventajas de este Nd:YAG "Q-switched" ($\lambda = 1064$ nm), sus limitaciones nos obligan a seguir investigando las técnicas disponibles y mejorando los equipos. De ahí el interés que reviste el estudio de otras longitudes de onda; por ejemplo, la posibilidad de usar el láser Nd:YAG en el segundo y tercer armónico (532 y 355 nm, respectivamente).

Para valorar la eficacia de la limpieza y evitar el daño al sustrato necesitamos ahondar en las técnicas de control y seguimiento de la operación del láser; los procesos de limpieza no parecen tan selectivos como se venía creyendo.

Finalmente, habrá que abordar las causas de los daños del sustrato asociados a la limpieza de dieléctricos, tales como el cuarzo, la calcita o los feldespatos, que constituyen fases principales de rocas ornamentales. Debe incluirse aquí el papel de los defectos cristalográficos y los bordes de grano en la absorción selectiva de la energía de la luz, así como el efecto ejercido por las reflexiones y difracciones internas con sus fenómenos asociados.

CARLOTA M. GROSSI
Universidad de East Anglia
Reino-Unido

Oncogénesis

Nuevos modelos animales

El cáncer es el resultado de la adquisición de mutaciones en genes que regulan el número de células que componen un tejido y, por tanto, la proliferación y muerte de las mismas. Además, estos genes también regulan la diferenciación y localización celular. De manera general, estas mutaciones afectan a tres grandes grupos de genes: oncogenes, genes supresores de tumores y genes que codifican proteínas reparadoras del ADN.

Desde hace 30 años se vienen estudiando los mecanismos que conducen a la génesis y desarrollo del proceso tumoral. Mediante el uso de líneas celulares se han dilucidado una gran cantidad de los mecanismos moleculares implicados en los sistemas de transducción de señales en el interior celular y entre células, y que regulan la proliferación, diferenciación y muerte celular.

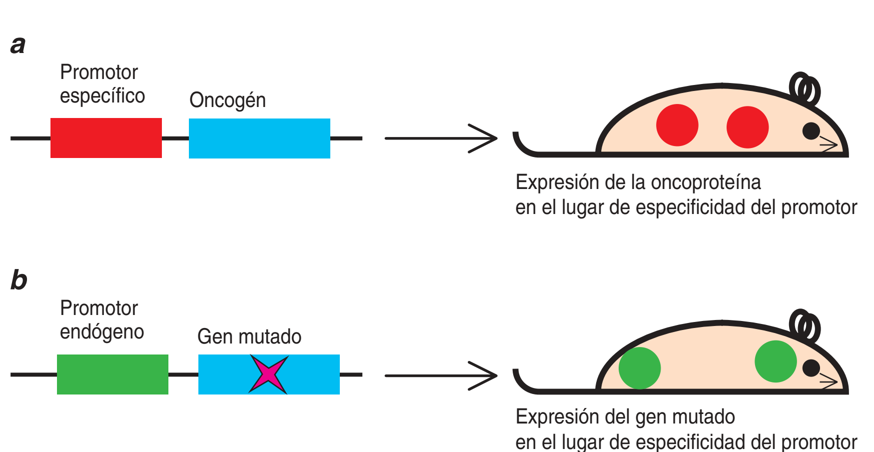
Sin embargo, el cáncer no constituye una enfermedad de una célula, ni siquiera de un conjunto de ellas, ya que un proceso tumoral conlleva una serie de características; por citar las más sobresalientes: angiogénesis, migración y metástasis tumoral en otras partes del organismo. Por ello, y para un mejor conocimiento global del proceso tumoral, se ha hecho necesaria la utilización de modelos animales genéticamente modificados, y entre ellos, el más utilizado ha sido el ratón.

Con los primeros modelos generados se consiguieron ya avances importantes. En particular dos: la activación de oncogenes mediante la creación de animales transgénicos a través de la inyección del ADN en el pronúcleo masculino del óvulo fecundado, y la mutación específica de genes supresores de tumores mediante recombinación homóloga en células madre embrionarias.

En el caso de la transgénesis se puede controlar la expresión del oncogén mediante el uso de promotores específicos de tejido (*véase la figura 1A*). En la recombinación homóloga, método que nos permite crear modelos *knock-out* (para estudiar el efecto que causa la inactivación de un gen supresor de tumores) o *knock-in* (para investigar el efecto producido por mutaciones específicas en genes de interés), la expresión se halla regulada por el propio promotor endógeno del gen modificado (*véase la figura 1B*).

Sin embargo, los modelos mencionados sirven sólo para abordar el cáncer familiar. En éste, la modificación genética se produce en la línea germinal; los descendientes pueden, pues, portar la modificación genética y, con ello, el riesgo de desarrollar el proceso tumoral.

Pero la mayoría de los cánceres se originan por mutaciones somáticas en una célula en el adulto, lo cual hace que los modelos reseñados no mimeticen con fidelidad absoluta las características del cáncer



1. Modelos al uso. Modelo transgénico para la sobreexpresión de un oncogén (*a*). Modelo generado mediante recombinación homóloga para el estudio de mutaciones en genes de interés (*b*).

en humanos. Esto obedece a varias razones: en primer lugar, la sobreexpresión de un oncogén en los modelos transgénicos o la mutación de genes mediante recombinación homóloga en la línea germinal (óvulo fecundado o célula madre embrionaria) puede desembocar en una letalidad embrionaria e imposibilitar el estudio del papel que esos genes ejercen en el desarrollo tumoral; en segundo lugar, el microambiente celular que rodea las primeras células cancerígenas es muy importante en el desarrollo tumoral, y en estos modelos, estas células también son portadoras de la anomalía genética; y, en tercer lugar, las mutaciones genéticas introducidas en la línea germinal pueden provocar fenómenos compensatorios durante la embriogénesis, de tal manera que se produzcan fenotipos inesperados o el desarrollo de tumores en tejidos diferentes a los esperados.

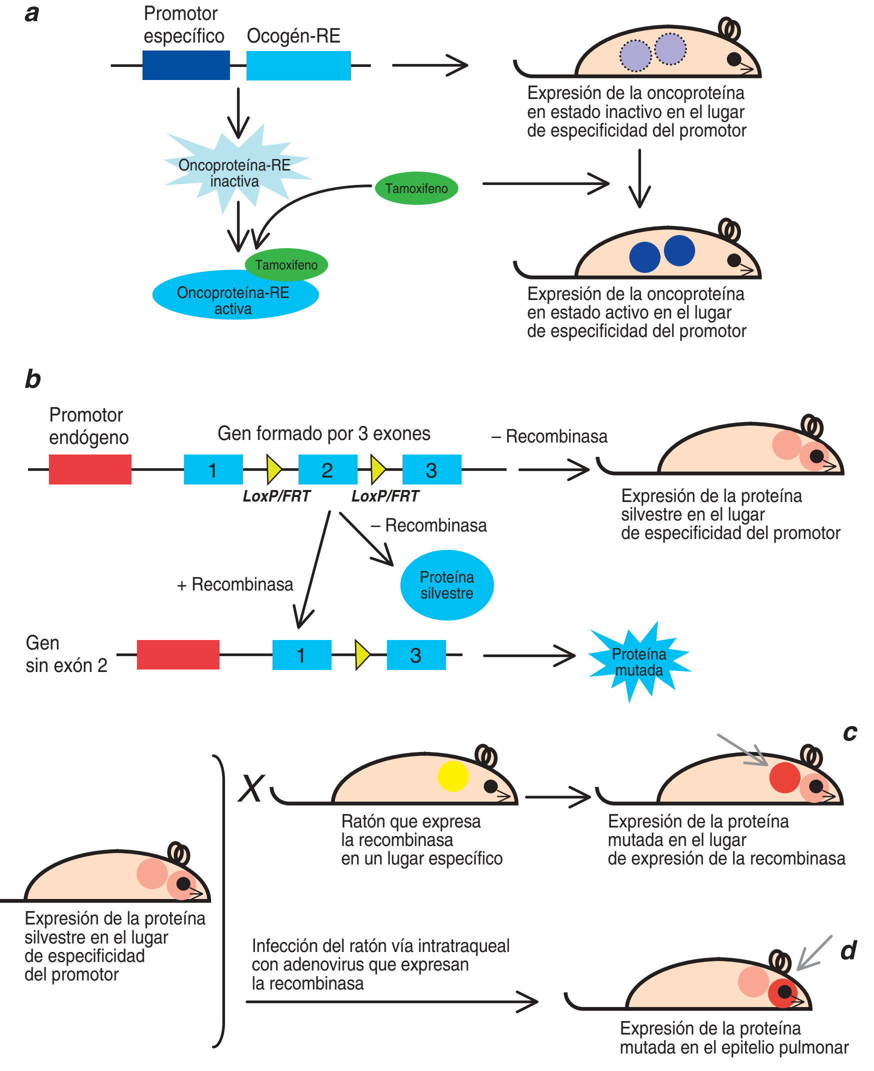
Para evitar estos problemas, resultaba obligado crear modelos animales en los cuales la inactivación de un gen supresor de tumores o activación de un oncogén se realizara de una forma controlada. Conocidos como modelos condicionales, podemos dividirlos en dos grandes grupos.

El primero incluye los denominados modelos de encendido/apagado. Nos ofrece un ejemplo de esta estrategia la expresión de una proteína de fusión (oncoproteína-receptor de estrógenos), que en condiciones normales, mantiene una forma inactiva. Sin embargo, tras la adición de tamoxifeno por vía oral, esta molécula se une al receptor de estrógenos y permite que se operen un cambio conformacional y la activación de la oncoproteína. La secuencia promotora que controla la expresión de la proteína de fusión determina la especificidad de la expresión (*véase la figura 2a*).

Para la creación del segundo grupo de modelos condicionales se han utilizado recombinasas de otras especies; la recombinasa *Cre* del bacteriófago *P1* y la recombinasa *FLP* de levadura. En presencia de esas enzimas, se producen deleciones de secuencias genómicas, que provocan la inactivación de un gen supresor de tumores o la activación de un oncogén. Para alcanzar ese objetivo, las secuencias genómicas a delecionar se flanquean por pequeñas secuencias de 34 pares de bases (secuencias *loxP* para la recombinasa *Cre* o secuencias *FRT* para la recombinasa *FLP*) y se introducen mediante recombinación homóloga en células madre embrionarias. En el momento en que se exprese la recombinasa, se producirá la deleción de las secuencias deseadas (*véase la figura 2b-d*). Merced a esta estrategia se evita el problema de la muerte embrionaria o la aparición de fenotipos inesperados.

La mutación del gen *Nf2* en humanos se halla asociada al desarrollo de schwannomas, tumores de las células que rodean a los axones de las neuronas. Sin embargo, los ratones *knock-out* para *Nf2* —que tienen los dos alelos del gen inactivados— mueren durante el desarrollo embrionario, mientras que los ratones heterocigotos —dotados de un alelo del gen silvestre y otro inactivado— desarrollan osteosarcomas y no schwannomas.

El grupo de Gilles Thomas (Fundación Jean Dausset-CEPH), ha creado un modelo condicional en el cual la inactivación del gen *Nf2* específicamente en las células de Schwann produce el desarrollo exclusivo de schwannomas. Para obtener ese modelo, cruzaron ratones cuyas secuencias *loxP* flanqueaban el exón 2 del gen *Nf2* con ratones transgénicos que expresaban la recombinasa *Cre* específicamente en células de Schwann. Los descendientes de este cruce sólo tenían inactivado el gen *Nf2* en las células de Schwann (*véase la figura 2c*).



2. Modelos condicionales. Modelo de encendido/apagado (*a*). Estrategias para la generación de modelos condicionales mediante la utilización de recombinasas (*b, c, d*).

Utilizando esta misma estrategia, se han conseguido aproximaciones al concepto de cáncer como mutación somática en el adulto. Así, el equipo de Anton Berns (Instituto del Cáncer de los Países Bajos), logró el desarrollo de cáncer de pulmón de célula pequeña en ratones adultos mediante la inactivación de los genes *retinoblastoma* (*Rb*) y *p53*, flanqueados por secuencias *loxP*, exclusivamente en el epitelio pulmonar. Para ello, infectaron los ratones, por vía intratraqueal, con un adenovirus que expresa la recombinasa *Cre* (*véase la figura 2d*).

Asimismo, en el laboratorio de Tyler Jacks (Instituto de Tecnología de Massachusetts) se ha demostrado que la pérdida del gen *Rb* en fibroblastos primarios quiescentes, mediante la adición al medio de cultivo de adenovirus que expresan la recombinasa *Cre* (modelo de expresión condicional), producía la entrada de las células en el ciclo celular. Por el contrario, fibroblastos procedentes de ratones que no expresan Rb en la línea germinal (*knock-out* para Rb) sufrían una parada irreversible de dicho ciclo. Este comportamiento se debía, en parte, a fenómenos de compensación, por los cuales, los fibroblastos procedentes de ratones *knock-out* para Rb aumentaban los niveles de la proteína p107. Este fenómeno compensatorio no se producía tras la pérdida de Rb en el modelo condicional.

Por tanto, los modelos condicionales han resultado ser muy útiles para evitar los fenómenos de letalidad embrionaria y fenotipos inesperados observados en los modelos al uso; todo apunta, pues, a que en los próximos años alcanzaremos un conocimiento más exacto de los mecanismos moleculares implicados en la génesis y el mantenimiento de las enfermedades de base genética.

PEDRO ANTONIO PÉREZ MANCERA
Instituto de Biología Molecular
y Celular del Cáncer
CSIC/Universidad de Salamanca

Definición de vida

¿Qué son los virus?

Los virus cruzan la frontera conceptual de la definición usual de vida. Presentan los principios químicos de replicación y evolución, genuinos de los seres vivos, pero acostumbran hallarse en estado inerte.

¿Poseen vida los virus? La pregunta reabre el debate inconcluso sobre los principios básicos de la vida. Sobre ésta no existe una definición científica incontrovertible. Se la identifica con el estado de un ser entre su nacimiento y su muerte. Para conservarse en ese estado, los organismos requieren autonomía bioquímica que les permita la producción de las moléculas y energía necesarias. La autonomía metabólica suele entrar en la mayoría de las definiciones de vida.

Ahora bien, desde mediados del siglo pasado se sabe que los virus son parásitos moleculares y simbiontes. Por su propia naturaleza, los parásitos cuestionan el concepto de autonomía, y los virus son parásitos en todos los aspectos biomoleculares de la vida. Acorde con ello, podríamos afirmar que los virus son parásitos inertes de sistemas metabólicos vivos.

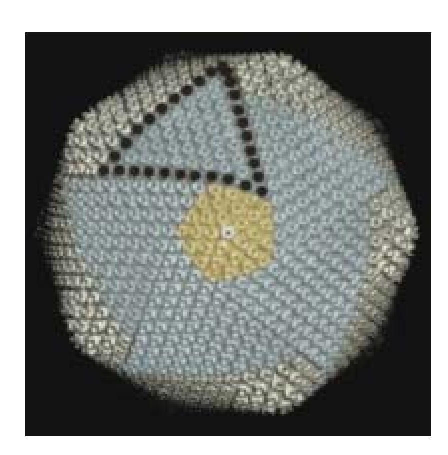
Pero la vida puede considerarse también una capacidad para seguir vivo, no sólo un metabolismo en operación continua. Una vacuola metabólicamente activa y carente de potencial genético para su propagación no se toma por viva. En cambio, una semilla en estado latente, aunque aparentemente sin vida, mantiene su potencial para vivir. Esta capacidad proviene de una célula viva; sin ésta la semilla moriría.

Los virus se parecen a las semillas más que a las células; gozan de cierto potencial para vivir y los podemos matar, pero nunca alcanzan un estado de vida autónoma. Se hallan en un estado de "vida prestada". Los virus son entidades químicas. Si los inscribimos, además, entre los seres vivos, habrá que considerar el lugar que ocupan en el curso de la evolución, es decir, situar en el árbol evolutivo sus procesos de reproducción y variación. Para muchos biólogos evolutivos, sin embargo, los virus no son entidades biológicas, ni deben, pues, hallar acomodo en el árbol de la vida. Los consideran entes tóxicos (en griego, *virus* significa tóxico), que matan a los huéspedes más débiles o constituyen una parte nociva, desechable, del hábitat natural.

Defensora de este punto de vista, Linn Margulis, de la Universidad de Boston, cifra en la célula la unidad mínima de la vida; la célula más elemental posee unos 500 genes. Dado que los virus carecen de los medios para producir sus propias proteínas, se comportan como compuestos químicos y no como células. En el marco de esta tesis, los virus quedarían relegados al papel de meras partículas derivadas, por degeneración, del huésped.

La consideración del virus como un compuesto químico tiene una larga trayectoria. Desde 1935, cuando Wendell Stanley y sus colegas cristalizaron el virus del mosaico de tabaco, tal idea se ha venido ratificando. Antes, se admitía que los virus representaban los principios genéticos y formas vivas más simples. Idea que, por ironía de las cosas, resultó determinante en los años cincuenta para el desarrollo de la biología molecular. A ellos se recurrió para descifrar los principios genéticos básicos y los mecanismos moleculares de las funciones orgánicas. Desde entonces, se ha comprobado que los procesos básicos de la vida son esencialmente procesos químicos. Podemos cristalizar los componentes esenciales de la vida, incluidas las subunidades ribosómicas (complejos de proteína y ARN responsables de la síntesis de proteínas).

A pesar de que los orgánulos subcelulares (mitocondrias, membranas y demás) y las macromoléculas (ADN, ARN, genes, y enzimas) no se consideran, por sí mismos, entidades vivas, manifiestan unos niveles de complejidad química equivalente a los que hallamos en muchos virus. Las células se suponen vivas mientras persistan funcionalmente interactivos sus componentes. De manera idéntica, los virus son entes vivos sólo cuando forman parte de las células que les cobijan. Con otras



¿Un compuesto químico o un ente vivo? La figura esquemática del PBCV-1 muestra un virus de ADN gigante del alga cloroela. Posee unos 400 genes; muchos de ellos constituyen el ejemplo más pequeño de sus familias de genes correspondientes. (Cortesía de James L. Van Etten, *Ann. Rev. Genet. vol. 37, págs. 153-195*)

palabras, el estado "vivo" de los virus depende de un huésped vivo.

Pero, de nuevo, el comportamiento de los virus torna a cuestionar las ideas al uso sobre la vida y la muerte. Algunos virus muertos pueden "volver a la vida"; otros, crecer en una célula huésped muerta, en vacuolas metabólicamente activas. Esta última capacidad se manifiesta, sobre todo, en huéspedes unicelulares, muchos de los cuales viven en los océanos y se hallan expuestos a una persistente radiación ultravioleta letal.

La luz ultravioleta degrada los sistemas funcionales de las bacterias, cianobacterias fotosintéticas y algas. Pero algunos virus tienen o codifican enzimas que reparan moléculas y mecanismos dañados del huésped, restaurando su capacidad genética y bioquímica. En el caso de los virus fotosintéticos (cianofagos), el componente más sensible de la cianobacteria es la enzima que opera como centro fotosintético. En presencia de luz, la enzima puede sobreactivarse, con la degradación consiguiente del proceso de fotosíntesis y del metabolismo celular. Algunos cianofagos codifican, sin embargo, versiones víricas de esta enzima más resistentes, dotando al huésped de mayor fuerza para hacer frente al efecto devastador de la luz ultravioleta. El genoma del huésped, mucho mayor que el de los virus, se halla más expuesto al efecto destructor de la luz ultravioleta.

Pero la luz ultravioleta ataca también a los virus. A ella se recurre en el laboratorio para inactivarlos o destruirlos. Por sorprendente que parezca, los virus muertos pueden, a veces, tornar a la vida. Aludimos al proceso de reactivación múltiple: si una célula se infecta por más de un virus "muerto", el conjunto de los genomas víricos pueden restañar, por complementariedad, el daño y reintegrarse, por recombinación genética, para formar un virus completo. Y porque los virus muertos contribuyen con una parte de su genoma para la construcción de un virus completo, nos hallamos ante un posible proceso de selección de grupo. Merced a esa capacidad de rearmarse podemos crear en el laboratorio recombinantes de virus artificiales. Los virus constituyen la única entidad biológica que tiene capacidad de resucitar. Entiéndase bien: un virus deficiente no es necesariamente un virus muerto. Ni la destrucción parcial del metabolismo celular, ni la degradación parcial de su capacidad para vivir excluye el potencial de replicación.

¿Qué es, pues, la vida? ¿Un estado metabólico o un potencial genético? ¿Son o no entidades vivas los virus? En nuestra opinión, podremos explicar los diferentes puntos de vista a partir del concepto de propiedades emergentes complejas. A partir del carácter emergente de la vida, se reconcilian la visión molecular y evolutiva. Una célula sin núcleo se halla en un estado muerto si falla todo el complejo crítico que mantiene sus funciones.

¿Inducen cambios los virus en los principios de la biología evolutiva y el origen de los organismos? A tenor de una propuesta reciente, los virus pertenecen al dominio de la biología porque presentan genes, se replican, evolucionan y están adaptados a un huésped, un hábitat y un nicho ecológico determinados. La mayoría de los virus que se conocen son persistentes, no se manifiestan y no son patógenos (o tóxicos). Muchos de estos virus tienen su propia historia evolutiva, que se remonta al origen de la célula.

Por ejemplo, las enzimas que reparan los daños causados por luz ultravioleta —escisión y resíntesis del ADN dañado, ligamiento del ADN roto, recuperación del daño causado por los radicales de oxígeno, etc.— son genes víricos específicos, que han persistido. Los virus generan genes únicos en grandes cantidades. El virus mayor, el mimivirus de ADN, tiene más genes que la célula más pequeña; la mayoría de tales genes son únicos.

Muchos autores sugieren que los genes víricos "se detraen" durante el proceso de transferencia horizontal de un huésped al otro. Pero se trata de una interpretación muy simplificada y, por lo común, incorrecta. Los genomas víricos pueden colonizar permanentemente a su huésped al agregar genes propios al linaje de su huésped y, por esa vía, condicionar el genoma del huésped (profagos). Es evidente la colonización vírica en el pasado. Todo indica que los organismos son susceptibles a las enfermedades inducidas por los virus.

Desde los replicadores químicos prebióticos hasta las poblaciones humanas, pasando por la vida unicelular, los virus intervienen en el funcionamiento de la vida; determinan quién sobrevive y, por lo tanto, modifican el paisaje adaptativo. Los virus también evolucionan y crean nuevos genes y especies víricas, en algunas ocasiones a una velocidad sorprendente. ¿A qué se debe que este acervo génico vírico, inmenso, dinámico y antiguo, haya conformado el proceso evolutivo? Aunque lo ignoramos, cabe suponer su participación decisiva en la enorme radiación adaptativa de los procariotes, quienes representan el mayor componente de biodiversidad del planeta.

Los virus, cosmopolitas, resultan, así creemos, imprescindibles en la red de la vida. Representan la frontera evolutiva entre lo vivo y el mundo químico. Es tiempo de que reconozcamos y estudiemos su función en el entramado biológico, independientemente de que sean o no entidades vivas.

Luis P. Villarreal
Luis M. Mota-Bravo
Dpto. de Biología Molecular
y Bioquímica,
Universidad de California en Irvine

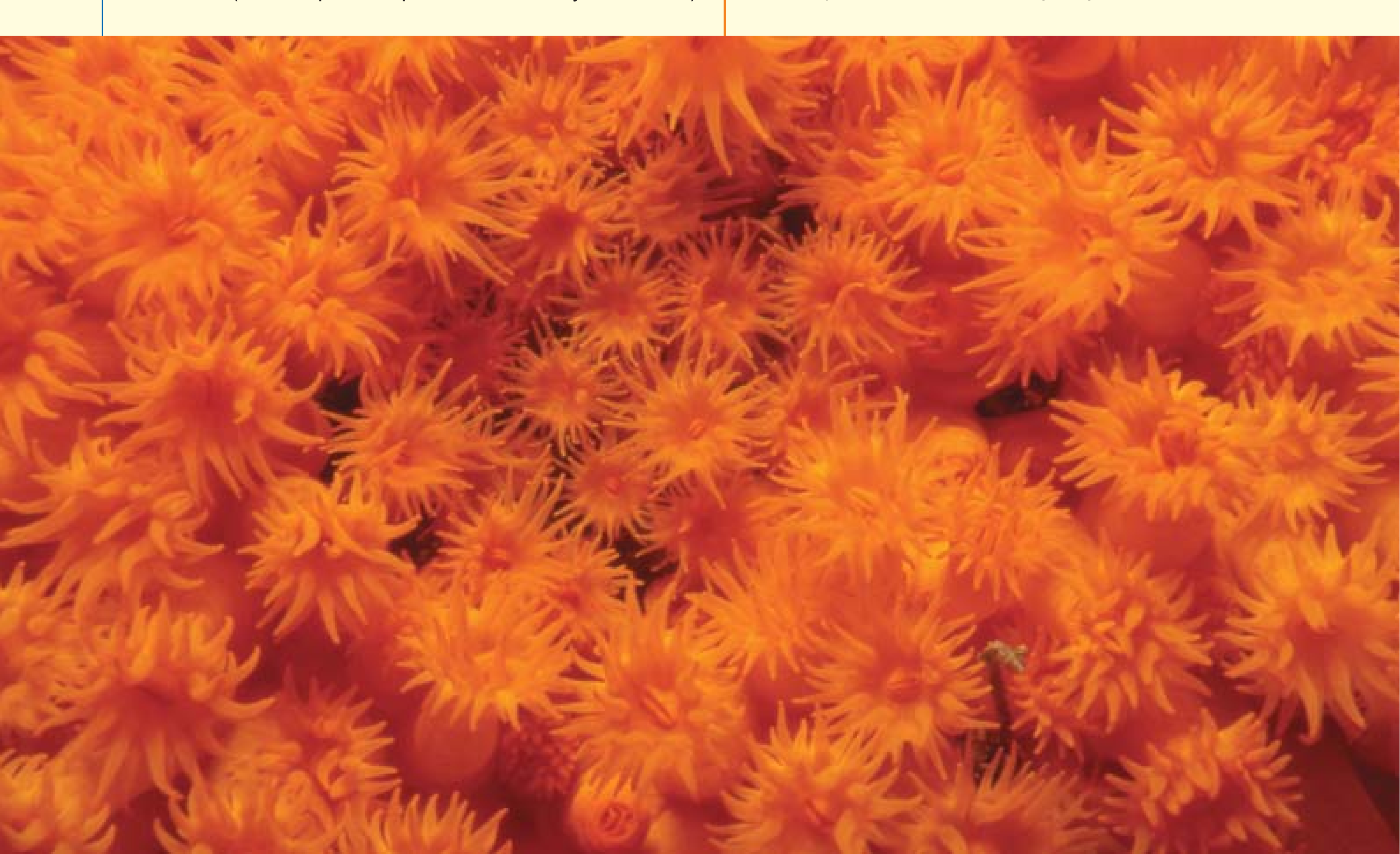
Pablo J. López González, M.ª Dolores Medel y Josep-Maria Gili

Las flores del mar

Hasta mediados del siglo XVIII, no se tuvo una idea precisa de la naturaleza animal de los corales. En su magnífico tratado *De plantis libri* XVI Andrea Cesalpino (1519-1603) los incluía en el grupo de "plantas sin semillas", junto con las algas, helechos, musgos y hongos. John Ray (1627-1705) confinaba a corales y esponjas en el grupo de las "plantas imperfectas", junto con hongos, hepáticas y musgos. Luigi Ferdinando Marsili (1658-1730) fue más lejos al ver en los pólipos "las flores del coral". Corona esa línea de pensamiento Carolus Linnaeus, quien en la edición de 1747 de su *Sistema Naturae* sitúa a corales y esponjas (*Lithophyta*) en el *Regnum Vegetabile*. Paolo Boccone (1633-1704) representa, por contra, el otro punto de vista, el que confina a los corales en el reino mineral. La perplejidad se mantuvo hasta 1753, cuando Jean-André Peyssonnel observó la contracción, expansión y movimiento de los tentáculos de los pólipos de coral. Este naturalista reconoció su naturaleza animal y sus afinidades con otros cnidarios como anémonas, gorgonias e hidrozoos.

Entre los zoófitos llaman poderosamente la atención las colonias de hidrozoos, cuyos pólipos no suelen sobrepasar el milímetro y se confunden a menudo con algas. Más o menos ramificados o con aspecto plumoso, los hidrozoos guardan para sí el secreto de sus componentes. En 1755 Ellis dibujó colonias de hidrozoos (en su opinión, "plantas marinas y coralinas"), las desecó y colocó en pliegos de papel como si de un herbario se tratase. De ese mismo modo se conservan todavía especies de hidrozoos en el Museo Británico de Historia Natural en Londres. En su honor hemos de señalar que a Ellis no se le escapó la homología de los hidrozoos con el mundo animal, ni tampoco la maravillosa delicadeza de sus formas: *"The minutest works of creation are not always the less wonderful"*, anotó a modo de presentación.

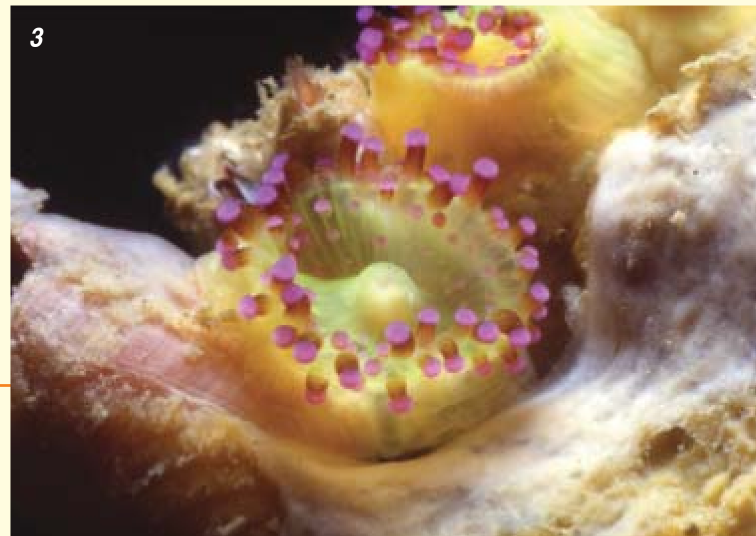
Desde el punto de vista ecológico, los corales y grupos afines son comparables a los bosques de las tierras emergidas. Los corales estructuran comunidades tridimensionales, que sirven de soporte a una multitud de especies que encuentran en los arrecifes refugio y alimento. Gracias a su estrategia trófica suspensívora, suponen un eslabón muy importante en la transferencia de materia y energía entre el seston (material en suspensión en la columna de agua, como zooplancton, fitoplancton, bacterias, partículas detríticas, etcétera) y el bentos (organismos que viven ligados al fondo marino).



1. El coral naranja (*Astroides calycularis*) es una de las joyas de la fauna submarina del Mediterráneo occidental. Esta especie colonial, de un intenso color naranja, tapiza la superficie de paredes verticales y entrada de cavidades a poca profundidad.



2. Característica de la zona infralitoral, esta especie de coral solitario (*Balanophyllia regia*) se encuentra en muchas de las costas rocosas europeas.



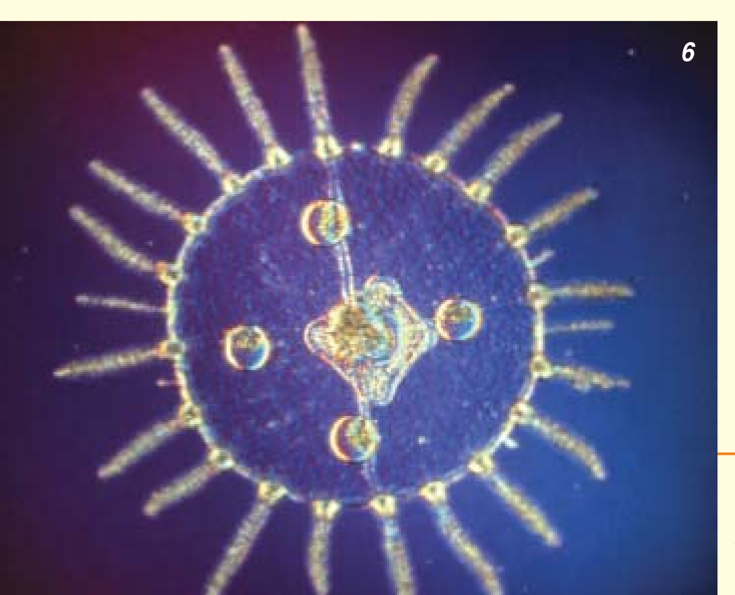
3. *Corynactis viridis* es una especie de coralimorfario, grupo morfológicamente intermedio entre los corales verdaderos (con esqueleto calcáreo) y las anémonas (sin esqueleto). El aspecto del pólipo nos recuerda a los corales, si bien carece de su esqueleto calcáreo.



4. Los pólipos de esta anémona (*Paranthus rugosus*) nos muestra la disposición radial de los ciclos de tentáculos acompañado de un patrón cromático radial con su boca en el centro del disco oral. El aspecto general de este pólipo nos recuerda al de muchas flores compuestas que podemos ver en nuestros jardines.



5. Las colonias de los hidrozoos suelen ser pequeñas (unos centímetros), delicadas y los pólipos mantienen la simetría radial en la disposición de sus tentáculos alrededor de la boca. En la foto la especie *Nemertesia ramosa*.

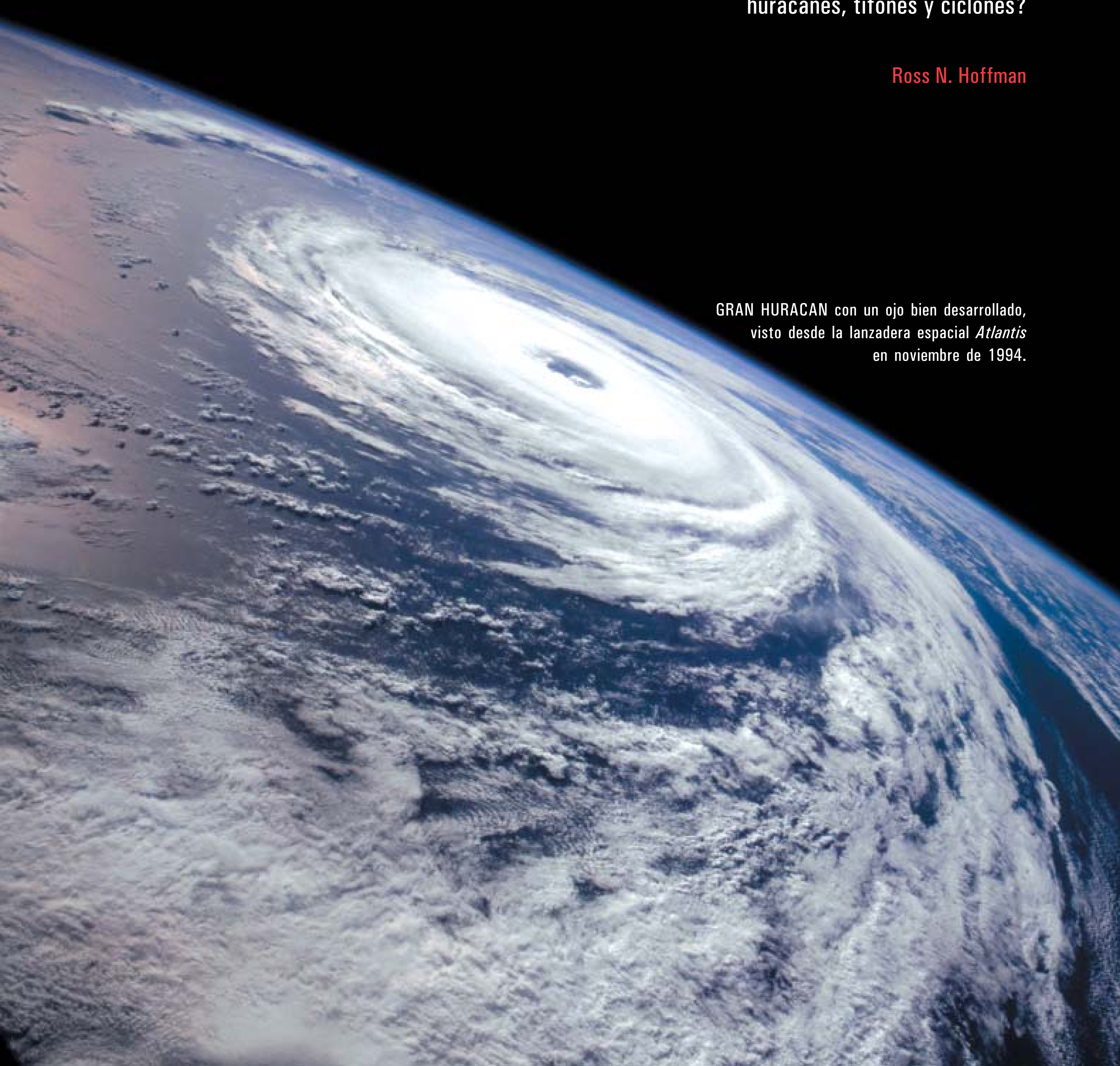


6. Muchos hidrozoos son capaces de originar pequeñas medusas que asumen la reproducción sexual de la especie. En la imagen una medusa de *Obelia* sp. (foto de Claude Carré).

El control de los huracanes

¿Se pueden moderar o desviar las grandes tempestades tropicales, huracanes, tifones y ciclones?

Ross N. Hoffman



GRAN HURACAN con un ojo bien desarrollado, visto desde la lanzadera espacial *Atlantis* en noviembre de 1994.

Cada año, enormes tempestades giratorias desencadenan vientos superiores a 125 kilómetros por hora. Barren los mares tropicales y devastan las costas. Cuando estas furiosas tempestades —llamadas huracanes en el Atlántico y el Pacífico oriental, tifones en el Pacífico occidental y ciclones en el océano Indico— se abaten sobre regiones densamente pobladas, pueden matar a millares de personas y causar daños por valor de miles de millones de euros. Y nada, absolutamente nada, se opone a su paso.

Pero, ¿deben esas terribles fuerzas de la naturaleza permanecer por siempre más allá de nuestro control? Mis compañeros y yo creemos que no. Nuestro grupo está investigando cómo podríamos desviar los huracanes hacia caminos más benignos, o desactivarlos. Aunque de este atrevido objetivo seguramente nos separan decenios, creemos que nuestros resultados muestran que no es demasiado pronto para ir estudiando ya las posibilidades.

Para plantearse siquiera el control de los huracanes, hay que tener la capacidad de predecir la trayectoria de la tempestad con finísima exactitud, de identificar las variaciones físicas (los cambios de temperatura, digamos) que influyen en su comportamiento y de hallar maneras de efectuar tales cambios. Aunque estos trabajos están en su infancia, las simulaciones informáticas de huracanes llevadas a cabo durante los últimos años dan a entender que algún día se podrá modificar un huracán. Lo mismo que hace tan difícil la predicción del tiempo —la extrema sensibilidad de la atmósfera a pequeños estímulos—, podría muy bien ser la clave para conseguir el control que perseguimos. Nuestro primer intento de influir en el rumbo de un huracán simulado mediante una ligera alteración de su estado inicial tuvo notable éxito. También los resultados subsiguientes han parecido favorables.

Para comprender que los huracanes y otras tempestades tropicales violentas quizá sean susceptibles de intervención humana, hay que conocer su naturaleza y orígenes (*véase el recuadro* "Anatomía de un huracán"). Los huracanes se forman a partir de grupos de tormentas sobre los océanos tropicales. Los mares de las bajas latitudes proporcionan continuamente calor y humedad a la atmósfera. Producen un aire cálido y húmedo sobre la superficie del mar. Cuando el aire asciende, el vapor de agua que contiene se condensa, forma nubes y causa precipitaciones. La condensación libera el calor solar que se necesitó para evaporar el agua de la superficie del océano. Este "calor latente de condensación" confiere mayor flotabilidad al aire y le obliga a ascender en un proceso que se refuerza a sí mismo. Con el tiempo, la depresión tropical se organiza e intensifica: se crea el conocido ojo, la depresión central en calma a cuyo alrededor gira el huracán. Al alcanzar tierra, queda cortada la fuente de agua caliente que mantiene la tempestad, que se debilita enseguida.

Sueños de control

Como un huracán obtiene gran parte de su energía del calor liberado cuando el vapor de agua sobre el océano se condensa en nubes y lluvia, los primeros investigadores que soñaron en domesticar estos ingobernables gigantes pensaron en alterar el proceso de condensación mediante la siembra de nubes, por entonces la única manera práctica de tratar de modificar el tiempo. A principios del decenio de 1960, una comisión asesora, reunida por el gobierno de los EE.UU. bajo el nombre de *Project Stormfury* (Proyecto Furia de la Tempestad), realizó una serie de valientes, o tal vez temerarios, experimentos para determinar si ese enfoque podría dar resultado.

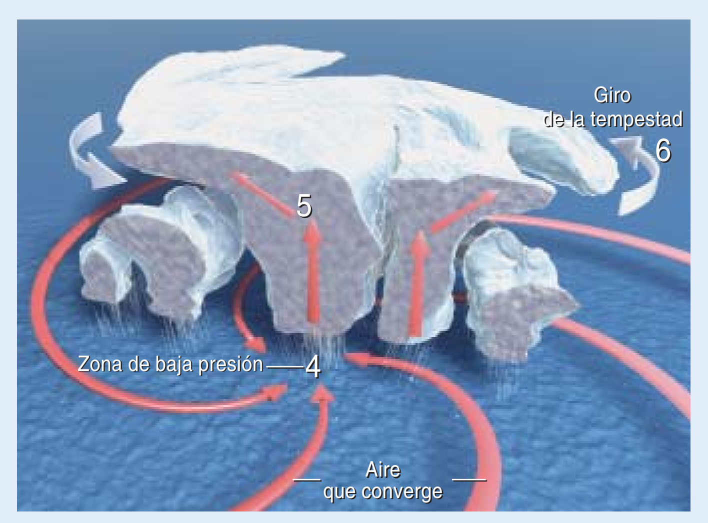
El Proyecto Furia de la Tempestad se proponía retrasar el desarrollo de un huracán aumentando la precipitación en la primera banda de lluvia exterior a la pared del ojo. Para ello sembró esas nubes con partículas de yoduro de plata dispersadas desde un avión; habían de servir de núcleos de condensación para la formación de hielo a partir de vapor de agua subenfriado por haber ascendido a los más altos y fríos dominios de la tempestad. Si todo marchaba como se preveía, las nubes crecerían más rápidamente, consumirían la provisión de aire cálido y húmedo cercano a la superficie oceánica y reemplazarían así a la antigua pared del ojo. El proceso ensancharía el radio de éste y reduciría la intensidad del huracán de manera parecida a como una patinadora frena su rotación extendiendo los brazos.

CORTESIA DE NASA/CORBIS

ANATOMIA DE UN HURACAN

Mediante la alteración de las condiciones físicas iniciales (la temperatura del aire o la humedad, por ejemplo) en el centro de la tempestad, o incluso en las zonas circundantes, creen algunos que podría debilitarse la fuerza de los huracanes o desviarlos hacia rutas menos peligrosas, Para lograrlo, se necesitan predicciones precisas y detalladas de la evolución de los huracanes. Esquematizamos aquí los mecanismos de generación de esas violentas tempestades.

Los huracanes empiezan a formarse cuando los océanos tropicales liberan calor y vapor de agua que va a parar a la atmósfera; se generan grandes cantidades de aire cálido y húmedo sobre la superficie (*1*). El aire cálido asciende; el vapor de agua que contiene se condensa entonces, con la consiguiente formación de nubes y lluvia (*2*). Esta condensación desprende calor, con lo que el aire de las nubes tormentosas en desarrollo asciende todavía más (*3*).



La liberación de calor sobre los mares tropicales crea una zona de baja presión en la superficie; hacia la misma converge aire adicional, cálido y húmedo, del perímetro exterior (*4*). Este continuo movimiento hacia el interior de la tormenta en crecimiento impulsa enormes cantidades de calor, aire y agua hacia arriba (*5*). La corriente ascendente y la liberación de calor potencian la convergencia del aire circundante hacia el centro de la tempestad en crecimiento, que empieza a circular bajo la influencia de la rotación terrestre (*6*). El proceso continúa a buen ritmo: la tempestad se refuerza e intensifica.

Los resultados de Furia de la Tempestad fueron, en el mejor de los casos, ambiguos. Los meteorólogos de hoy no esperan que esta particular aplicación de la siembra de nubes sea efectiva en los huracanes porque, pese a lo que se creía, las tempestades contienen poco vapor de agua subenfriado.

Tiempo caótico

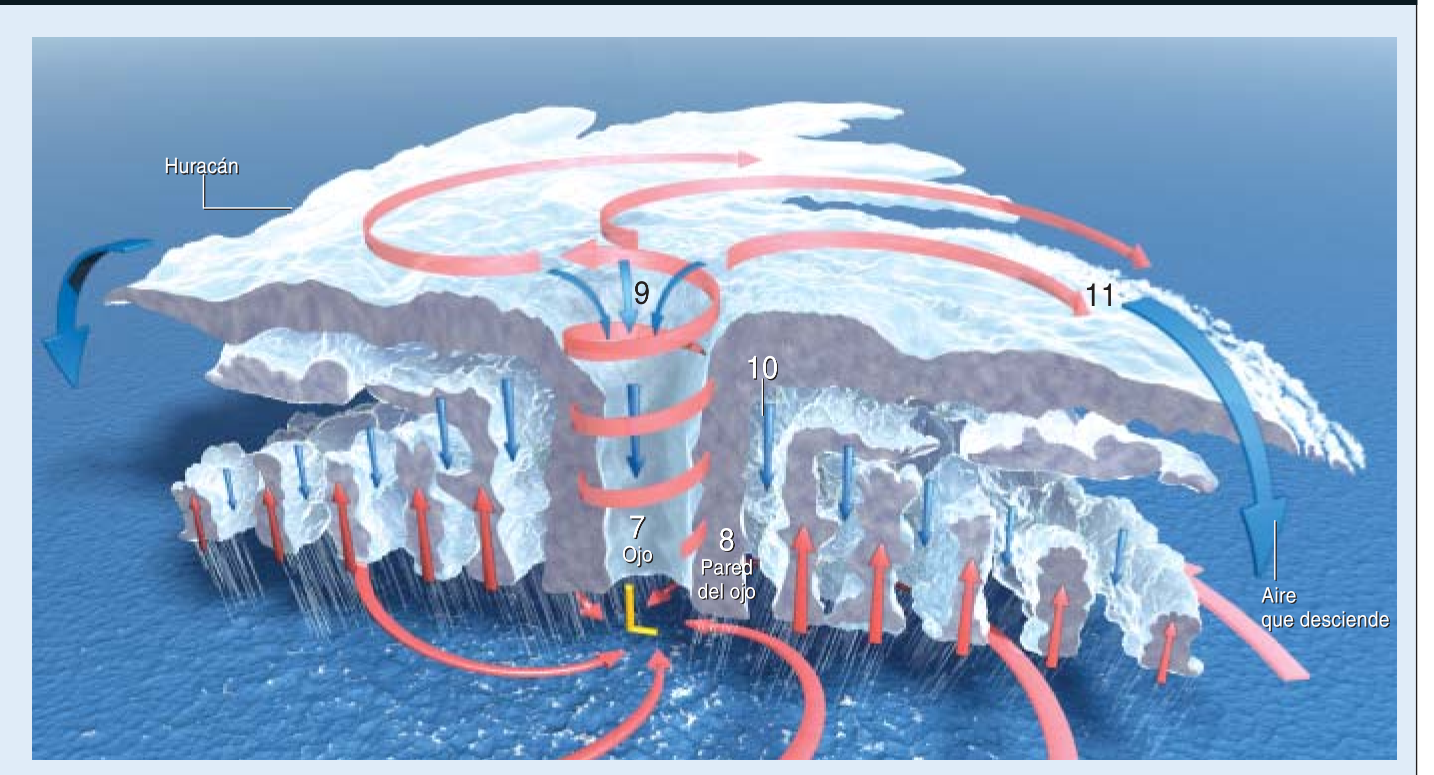
Los estudios que acometemos hoy proceden de una intuición que tuve hace 30 años, cuando, durante mi doctorado, me familiarizaba con la teoría del caos. Un sistema caótico parece comportarse al azar, pero en realidad está regido por ciertas reglas. Es también muy sensible a las condiciones iniciales, de manera que cambios aparentemente insignificantes y arbitrarios en las condiciones pueden causar profundos efectos que conducen en poco tiempo a consecuencias imprevisibles. Pequeñas variaciones en la temperatura del océano, en la situación de las corrientes atmosféricas a gran escala (que rigen los movimientos de la tempestad) e incluso en la forma de las nubes de lluvia que giran en torno al ojo, repercuten de forma decisiva en la trayectoria y la intensidad de un huracán.

La gran sensibilidad de la atmósfera a pequeñas influencias —y la rápida agregación de pequeños errores en los modelos de predicción del tiempo— hace muy difícil dicha predicción con más de cinco días de antelación. Pero esta sensibilidad me indujo a pensar que unas débiles intervenciones acabarían quizá generando potentes efectos que alejarían las trayectorias de las tem-

Resumen/Domesticar huracanes

- Se están simulando huracanes históricos mediante complicados modelos de predicción del tiempo. Reproducen los complejos procesos internos que resultan cruciales para el desarrollo y evolución de los temporales tropicales más violentos.
- Se ha confirmado así que estos sistemas enormes y caóticos son sensibles a cambios pequeños en sus condiciones iniciales —en la temperatura del aire y la humedad, por ejemplo— cerca del centro del temporal y en las regiones circundantes.
- Gracias a complicadas técnicas matemáticas de optimización, se van conociendo las modificaciones aplicables a un huracán que debilitarían sus vientos o lo desviarían de las zonas pobladas.
- Si estos estudios teóricos tienen finalmente éxito, indicarían el camino hacia métodos prácticos de influir en el ciclo vital de los huracanes con el objeto de proteger vidas y haciendas.

DAVID FIERSTEIN



A medida que la tempestad se intensifica, se forma una depresión central y en calma: el ojo (*7*). Está rodeado por un anillo de nubes y vientos muy fuertes, la pared del ojo (*8*). La tempestad se ha convertido en un huracán. Al mismo tiempo, el aire ascendente, ahora calentado y perdida buena parte de su humedad, no puede ascender más porque la estratosfera actúa encima del huracán como una tapadera. Parte de este aire seco cae dentro del ojo (*9*) y entre las bandas de nubes (*10*), mientras que el resto se aleja en espiral del centro de la tempestad y desciende (*11*). Mientras, las corrientes atmosféricas a gran escala cercanas van arrastrando el huracán en su trayectoria.

pestades de los centros de población o reducirían las velocidades de sus vientos.

En aquella época no pude seguir adelante con estas ideas. Sin embargo, en el transcurso de los últimos diez años la simulación informática y la detección remota han avanzado lo suficiente para renovar mi interés en el control del tiempo a gran escala. Con la ayuda económica del Instituto de Concepciones Avanzadas de la NASA, en Investigación Atmosférica y Ambiental (AER), firma consultora que trabaja en el campo de la investigación y desarrollo, intentamos hallar, mediante detallados modelos informáticos de los huracanes, qué acciones podrían aplicarse en el mundo real. En particular, recurrimos a las técnicas de predicción del tiempo para simular el comportamiento de anteriores huracanes y observar después los cambios debidos a diversas intervenciones en la tempestad modelada.

Modelos del caos

Incluso hoy día, los mejores modelos informáticos para el pronóstico del tiempo dejan mucho que desear. Con un poco de empeño, sin embargo, podemos aplicarlos para simular las tempestades. Los modelos dependen de métodos numéricos que, para simular el complicado proceso de la evolución de la tempestad, calculan las condiciones atmosféricas en breves y sucesivos saltos cronológicos. La predicción numérica del tiempo se basa en una premisa: en la atmósfera no puede haber creación o destrucción de masa, energía, cantidad de movimiento y humedad. En un sistema fluido, y un huracán lo es, esas magnitudes conservadas siguen el movimiento del flujo, en nuestro caso el movimiento de la tempestad. En la vecindad de los bordes del sistema, no obstante, las cosas se complican. En la superficie del mar, por ejemplo, nuestras simulaciones muestran que la atmósfera gana o pierde en las cuatro magnitudes básicas conservadas.

Para los modelistas, el estado atmosférico equivale a una especificación completa de las variables físicas mensurables: presión, temperatura, humedad relativa y dirección y velocidad del viento. Estas magnitudes corresponden a las propiedades físicas conservadas en que se basan las simulaciones informáticas. En la mayoría de los modelos meteorológicos, las variables observables se especifican en los puntos de una red tridimensional que representa la atmósfera, de modo que es posible trazar un mapa de cada variable para cada altura. Los modelistas llaman estado del modelo a cada conjunto de valores de todas las variables en todos los puntos de la rejilla.

Para evaluar el tiempo que hará, un modelo numérico de predicción avanza repetidamente el estado del

modelo a partir de cierto instante por medio de pequeños intervalos de tiempo o *pasos* (que duran segundos o minutos, dependiendo de las escalas de movimiento que el grado de resolución del modelo pueda abordar). En cada paso, el modelo calcula los efectos de los vientos portadores de las diversas propiedades atmosféricas y de los procesos de evaporación, precipitación, rozamiento con la superficie, enfriamiento infrarrojo y calentamiento solar que tienen lugar en el área de interés.

Desgraciadamente, no hay predicciones meteorológicas perfectas. Para empezar, el estado inicial del modelo es siempre incompleto e inexacto. En el caso de los huracanes, los estados iniciales resultan particularmente difíciles de definir porque se cuenta con pocas observaciones directas, que no pueden acometerse fácilmente. No obstante, gracias a las imágenes de la nubosidad tomadas por satélites, sabemos que los huracanes tienen estructuras complicadas, ricas en detalles. Aun cuando estas imágenes de nubes pueden rendir un servicio, necesitamos saber mucho más.

En segundo lugar, incluso con un estado inicial perfecto, los modelos informáticos de tempestades tropicales violentas propenden al error. La atmósfera, por ejemplo, se modela sólo en los puntos de una red. Los rasgos menores que la anchura de la red, es decir, que la distancia entre dos puntos vecinos, no se conocen como es debido. Sin una resolución muy alta, la estructura de un huracán en la proximidad de la pared del ojo —su principal característica— queda borrosa y los detalles difusos. Además, los modelos —igual que la atmósfera que simulan— se comportan de manera caótica. Las inexactitudes debidas a esas dos fuentes de error crecen rápidamente a medida que los cálculos de la predicción prosiguen.

Pese a sus limitaciones, esta técnica sigue siendo útil para lo que nos proponemos. En nuestros experimentos, hemos modificado un sistema muy eficaz de inicialización de la predicción, la "asimilación variacional de datos en cuatro dimensiones" (4DVAR). La cuarta dimensión a la que se refiere el nombre es la cronológica. El Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo, uno de los mejores entes meteorológicos del mundo, usa esta complicada técnica para predecir el tiempo cada día. A fin de aprovechar al máximo las observaciones recogidas por los satélites, buques, boyas y sensores aerotransportados antes de incoar la predicción, 4DVAR las combina en una primera estima, bien fundada, del estado atmosférico inicial. A este proceso se le llama "asimilación de datos". Esa primera estima es, por lo general, un pronóstico para seis horas, válido cuando se toman las observaciones originales. Nótese que 4DVAR trata cada observación precisamente en el momento en que se tomó, en lugar de agruparlas en un intervalo de varias horas. Con el resultado que arroje la combinación de los datos de la observación y la primera estima se inicia la predicción de las seis horas subsiguientes.

En teoría, la asimilación de datos nos da una aproximación óptima del estado del tiempo, en la cual el ajuste de la representación del modelo a las observaciones se equilibra con su ajuste a la primera estima. Aunque la teoría estadística de este problema está clara, las hipótesis e información necesarias para su correcta aplicación no pasan de ser aproximadas. Como resultado, la asimilación de datos es, en la práctica, arte y ciencia a partes iguales.

4DVAR halla un estado atmosférico que, a la vez que satisface las ecuaciones del modelo, se encuentra cerca de la primera estimación y de las observaciones del mundo real. Lleva a cabo esta difícil tarea reajustando el estado del modelo al principio del intervalo de seis horas; para ello, toma en cuenta la diferencia entre las observaciones y la simulación del modelo realizada durante ese período. En particular, 4DVAR emplea esas diferencias para calcular la sensibilidad del modelo: en qué medida cambios mínimos de cada una de las variables afectarían al grado en que la simulación se ajusta a las observaciones. Este cálculo, en el que se emplea el llamado modelo adjunto, progresa hacia atrás en el tiempo a lo largo del intervalo de seis horas. Un programa de optimización elige entonces los mejores ajustes que puedan realizarse en el estado del modelo original, para así obtener la simulación que más se ciña al progreso del huracán real durante el período de seis horas.

Como el ajuste se hace mediante una aproximación de las ecuaciones del modelo, la totalidad del proceso (la simulación, las comparaciones, el modelo adjunto y la optimización) debe repetirse una y otra vez para afinar los resultados. Cuando el proceso ha concluido, las condiciones de la simulación al final del período de seis horas proporcionan la primera aproximación para el siguiente intervalo de seis horas.

Tras simular un huracán que tuvo lugar en el pasado, podemos alterar una o varias características en cualquier instante y examinar los efectos de tales perturbaciones. Resulta que la mayoría de esas alteraciones se amortiguan hasta desaparecer. Sólo las intervenciones con características especiales —una configuración o estructura particular que induzca autorrefuerzo— se desarrollarán hasta el punto de producir un efecto importante sobre la tempestad. Para formarse una idea de lo que esto significa, pensemos en un par de diapasones, uno vibrando y el otro en reposo. Si están afinados a diferentes frecuencias, el segundo no vibrará pese a estar sometido repetidamente al impulso de las ondas sonoras emitidas por el primero. Pero si ambos comparten la misma frecuencia, el segundo diapasón responderá de manera resonante y vibrará por simpatía. De manera análoga, nuestro problema consiste en hallar precisamente los estímulos adecuados —cambios en el huracán— que den por resultado una respuesta robusta que conduzca a los resultados deseados.

Calmar la tempestad

A fin de indagar si cabría aprovechar la sensibilidad del sistema atmosférico para modificar fenómenos atmosféricos de la fuerza de los huracanes, nuestro grupo de investigación de AER llevó a cabo experimentos de simulación informática con dos huracanes de 1992. Cuando el huracán Iniki pasó sobre la isla hawaiana de Kauai en sep-

tiembre de aquel año, murieron varias personas, los daños fueron enormes y bosques enteros quedaron arrasados. El huracán Andrew, que se abatió sobre Florida justo al sur de Miami el mes anterior, devastó la región.

No obstante las imperfecciones de las técnicas de predicción, nuestro primer experimento de simulación tuvo un éxito inmediato. Con el objeto de alterar la trayectoria de Iniki, elegimos el lugar donde queríamos que fuese a parar al cabo de seis horas: unos 95 kilómetros al oeste de la trayectoria prevista. Después, nos valimos de este blanco para crear observaciones artificiales e introducirlas en 4DVAR. Ajustamos el ordenador para que calculase el menor cambio, en el conjunto inicial de las propiedades definidoras del huracán, capaz de generar una trayectoria que condujese al lugar deseado. En este primitivo experimento, dejamos que actuase sobre el sistema tempestuoso cualquier clase de posible alteración artificial.

Las modificaciones más significativas concernían a las temperaturas y vientos iniciales. Los ajustes típicos de temperatura en la rejilla eran solamente de décimas de grado, pero la variación más notable —un aumento de casi dos grados Celsius— tuvo lugar en la capa más baja del modelo, al oeste del centro de la tempestad. De los cálculos se extraían alteraciones de la velocidad del viento de tres a cinco kilómetros por hora. En unos pocos puntos, no obstante, las velocidades variaron hasta 30 kilómetros por hora debido a pequeñas alteraciones de la dirección de los vientos en las cercanías del centro de la tempestad.

Aunque las versiones original y alterada del huracán Iniki mostra-

CONTROL DE HURACANES SIMULADOS

Se recurre a modelos informáticos para simular dos huracanes devastadores de 1992, Iniki y Andrew. Los colores representan categorías de velocidad del viento. Las líneas de nivel negras indican vientos de 90 km/h; este valor viene a coincidir con el umbral de devastación del meteoro.

En las simulaciones de Iniki (*derecha*), la trayectoria original del ojo (*línea negra de trazos*) lleva los vientos más fuertes de la tempestad sobre la isla hawaiana de Kauai. Pero cuando varias de las condiciones iniciales del modelo, entre ellas la temperatura y humedad en diversos puntos, se alteraron ligeramente, la trayectoria simulada de la tempestad (*línea roja de trazos*) se desplazó hacia el oeste de Kauai, pasando sobre un blanco elegido a 97 kilómetros de la isla. Después siguió hacia el norte; llegó a un enclave de la isla más a su oeste que el huracán real.

Los mapas de los mares próximos a las Bahamas y Florida (*abajo)* muestran simulaciones de Andrew en su estado inalterado (*izquierda*) y en una forma artificialmente perturbada (*derecha*). Aunque los vientos catastróficos persisten en el caso controlado, las velocidades máximas se han reducido bastante: un huracán de categoría 3 se ha quedado en huracán de categoría 1, mucho menos brutal.

LUCY READING

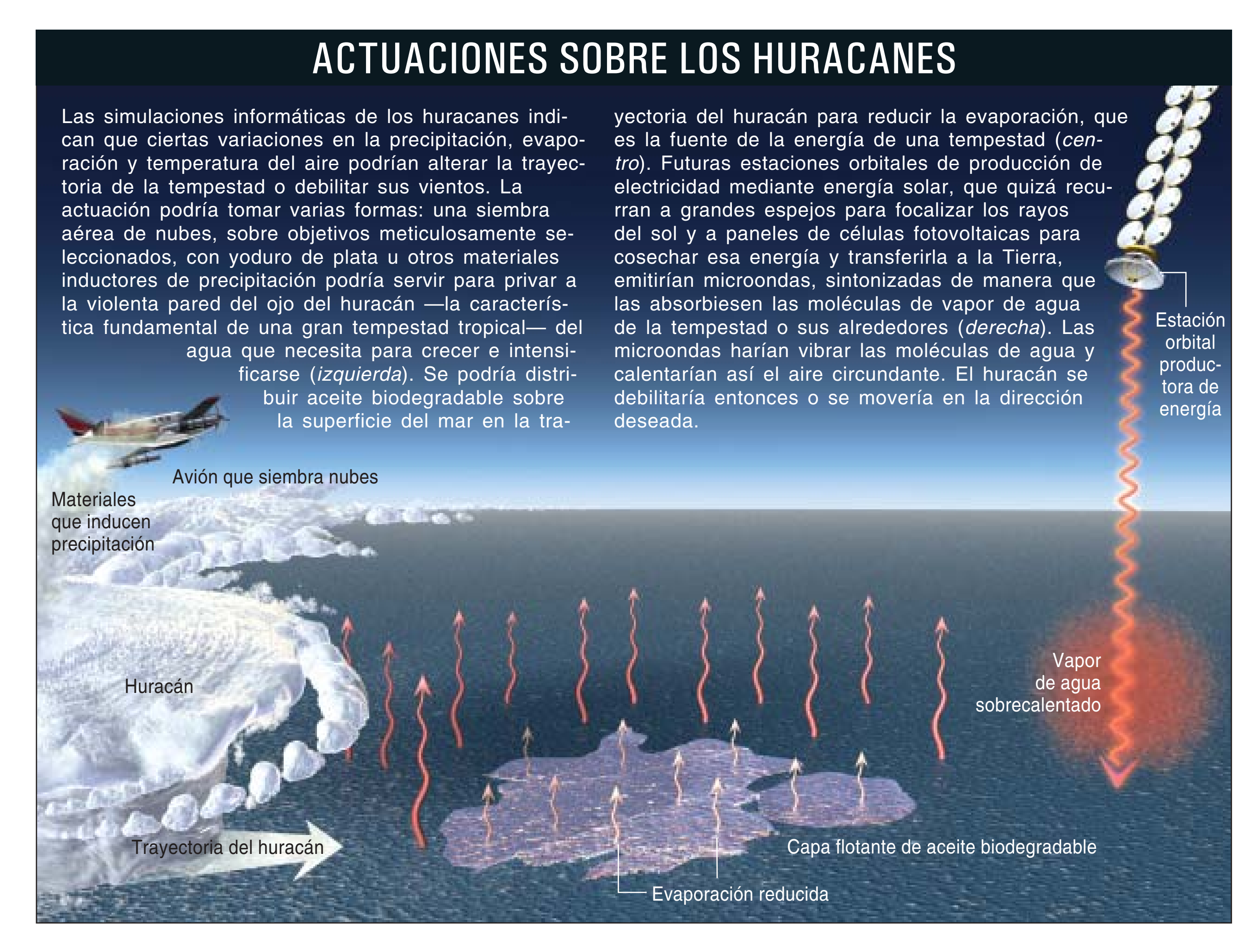
ban estructuras casi idénticas, las alteraciones de las variables clave fueron de cuantía suficiente para que la última se desviase hacia el oeste durante las primeras seis horas de simulación y luego se dirigiera hacia el norte, con lo que Kauai se libró de los vientos más destructores de la tempestad. Las alteraciones artificiales, no muy grandes, de las condiciones iniciales de la tempestad se habían propagado a través del complicado sistema de ecuaciones no lineales que simulaban la tempestad; ésta, en efecto, se presentó a las seis horas en el nuevo paradero que le habíamos asignado. Tamaña prueba nos dio confianza en que estábamos en el camino correcto hacia la determinación de los cambios necesarios para modificar huracanes reales. En las subsiguientes pruebas de simulación de huracanes, modelamos con rejillas de mayor resolución e impusimos a 4DVAR el objetivo de reducir al mínimo los daños materiales.

En un experimento efectuado con ese temporal modificado, calculamos los incrementos de temperatura necesarios para limitar los daños que el viento causaba en la superficie cuando el huracán Andrew alcanzaba la costa de Florida. Nuestro objetivo era mantener mínima la perturbación inicial de temperatura (para que fuese fácil llevarla a cabo en la realidad, dentro de lo posible) y reducir los vientos más destructores en las últimas dos horas del primer intervalo de seis. En este ensayo, 4DVAR determinó que la mejor manera de reducir los daños producidos por los vientos consistía en inducir las mayores modificaciones de la temperatura inicial cerca del ojo de la tempestad. Ahí, la simulación produjo cambios de hasta dos o tres grados en algunos puntos. Las alteraciones menores de temperatura (inferiores a 0,5 grados) se extendían entre 800 y 1000 km del ojo. Estas perturbaciones mostraban una configuración ondulatoria, con anillos alternantes de calentamiento y enfriamiento centrados en el huracán. Aunque sólo la temperatura se había alterado al comienzo, se resintieron muy pronto todas las variables clave. En el caso del huracán real simulado, los vientos destructivos (superiores a 90 km/h) cubrieron regiones pobladas del sur de Florida al cabo de seis horas; no así en el modelo alterado.

Como prueba de la robustez de estos resultados, aplicamos la misma perturbación a una versión del modelo más complicada y de mayor resolución. Obtuvimos resultados muy semejantes. Quedaba con ello ratificado que nuestros experimentos son razonablemente insensibles a la particular elección de la configuración del modelo. Pasadas seis horas, sin embargo, los vientos destructivos reaparecieron en la simulación alterada, de modo que se habrían requerido intervenciones adicionales para mantener el sur de Florida a salvo. Parece como si se

ACTUACIONES SOBRE LOS HURACANES

Las simulaciones informáticas de los huracanes indican que ciertas variaciones en la precipitación, evaporación y temperatura del aire podrían alterar la trayectoria de la tempestad o debilitar sus vientos. La actuación podría tomar varias formas: una siembra aérea de nubes, sobre objetivos meticulosamente seleccionados, con yoduro de plata u otros materiales inductores de precipitación podría servir para privar a la violenta pared del ojo del huracán —la característica fundamental de una gran tempestad tropical— del agua que necesita para crecer e intensificarse (*izquierda*). Se podría distribuir aceite biodegradable sobre la superficie del mar en la trayectoria del huracán para reducir la evaporación, que es la fuente de la energía de una tempestad (*centro*). Futuras estaciones orbitales de producción de electricidad mediante energía solar, que quizá recurran a grandes espejos para focalizar los rayos del sol y a paneles de células fotovoltaicas para cosechar esa energía y transferirla a la Tierra, emitirían microondas, sintonizadas de manera que las absorbiesen las moléculas de vapor de agua de la tempestad o sus alrededores (*derecha*). Las microondas harían vibrar las moléculas de agua y calentarían así el aire circundante. El huracán se debilitaría entonces o se movería en la dirección deseada.



DAVID FIERSTEIN

necesitara una serie de perturbaciones planeadas para controlar un huracán durante un tiempo indefinido.

¿Quién puede detener la lluvia?

Si es cierto, como nuestros resultados sugieren, que bastan pequeños cambios en la temperatura en un huracán o a su alrededor para alterar su trayectoria en una dirección previsible o reducir sus vientos, cabe preguntarse: ¿cómo se pueden generar tales perturbaciones? Por supuesto, no se pueden alterar instantáneamente las temperaturas de un fenómeno de las proporciones de un huracán. Cabría la posibilidad, no obstante, de calentar el aire a su alrededor e ir ajustando así la temperatura.

Nuestro grupo se propone llevar a cabo experimentos en los que calcularemos la configuración precisa y la intensidad del calentamiento necesario para moderar la intensidad del huracán o alterar su trayectoria. Indudablemente, la cantidad de energía requerida será enorme, pero tal vez, en el futuro, un conjunto de estaciones de energía solar en órbita alrededor de la Tierra proporcione la suficiente.

Estos satélites generadores de energía dirigirían con espejos gigantes la luz del Sol a pilas solares y enviarían después un haz de la energía obtenida a receptores de microondas en el suelo. Según los proyectos actuales, las estaciones productoras de energía solar en el espacio radiarían microondas en frecuencias que atraviesan la atmósfera sin calentarla, de modo que no se desperdiciase energía. Pero si el objetivo fuese controlar el tiempo, se sintonizaría el haz de microondas a frecuencias que el vapor de agua absorbiese mejor. De esa manera se podrían calentar a voluntad diferentes niveles en la atmósfera. Como las gotas de agua absorben intensamente las microondas, las partes del huracán internadas en las nubes de lluvia, o subyacentes bajo las mismas, quedarían protegidas y no se calentarían.

En nuestros anteriores experimentos, 4DVAR pronosticó grandes cambios de temperatura justo donde no podría funcionar el calentamiento por microondas. Realizamos, pues, otro experimento en el que obligamos a la temperatura del centro del huracán a mantenerse constante durante nuestro cálculo de las perturbaciones óptimas. Los resultados finales se parecieron a los originales; mas, para compensar la falta de cambios en la temperatura inicial del centro de la tempestad, los restantes cambios de temperatura fueron mayores. Durante la simulación, los cambios de temperatura se desarrollaron rápidamente en la vecindad del centro de la tempestad.

Otro método potencial para modificar tempestades tropicales de gran magnitud consistiría en limitar directamente la disponibilidad de energía. ¿Cómo? Recubriendo el océano con una capa de aceite biodegradable que retardase la evaporación. Se podría también influir sobre los huracanes introduciendo modificaciones graduales días antes de que se acercasen a tierra, a miles de kilómetros aún de sus posibles blancos. La alteración de la presión atmosférica que causarían esas actuaciones estimularía variaciones de la configuración a gran escala de los vientos en la corriente en chorro, con efectos importantes en la intensidad y trayectoria del huracán. Además, es posible que alteraciones ligeras de nuestras actividades normales —cambiar los planes de vuelo de los aviones para situar de manera precisa las estelas de condensación y así aumentar la cobertura nubosa, o variar el riego de las cosechas para favorecer o reducir la evaporación— indujesen las alteraciones iniciales apropiadas.

¿Qué pasa si el control da resultado?

Si el control meteorológico diera resultado en el futuro, crearía serios problemas políticos. ¿Qué pasaría si la intervención hiciera que un huracán produjese daños en el territorio de otra nación? Y, aunque el uso de la modificación del tiempo como arma fue prohibido por una Convención de las Naciones Unidas a fines del decenio de 1970, algunos países podrían caer en la tentación.

Sin embargo, antes de que se planteen preocupaciones de esa índole, habría que haber puesto a prueba nuestros métodos en fenómenos atmosféricos distintos de los huracanes. Creemos que nuestras técnicas deberían ensayarse primero con el incremento de las precipitaciones. Una zona pequeña, que se cubriría densamente con sensores, serviría como banco de pruebas. A escalas reducidas, las perturbaciones se generarían desde aviones o desde el suelo. Si nuestra comprensión de la física de las nubes, la simulación de nubes por ordenador y la técnica de la asimilación de datos avanzan con la celeridad esperada, estas modestas pruebas podrían efectuarse dentro de 10 o 20 años. Si tienen éxito, el control del tiempo a mayor escala, por medio del calentamiento desde el espacio, se convertiría en un objetivo razonable que las naciones podrían acordar perseguir.

El autor

Ross N. Hoffman es científico principal y vicepresidente de investigación y desarrollo de *Atmospheric and Environmental Research*, empresa de Lexington, Massachusetts.
Desea agradecer a la NASA el apoyo a su trabajo, así como a sus colaboradores de AER, particularmente a John Henderson, su particular ayuda en este trabajo.

Bibliografía complementaria

THE RISE AND FALL OF WEATHER MODIFICATION: CHANGES IN AMERICAN ATTITUDES TOWARD TECHNOLOGY, NATURE, AND SOCIETY. Chunglin Kwa en *Changing the Atmosphere: Expert Knowledge and Environmental Governance*. Dirigido por Clark A. Miller y Paul N. Edwards. MIT Press, 2001.

CONTROLLING THE GLOBAL WEATHER. Ross N. Hoffman en *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 83, n.º 2, págs. 241-248, febrero 2002.

CRITICAL ISSUES IN WEATHER MODIFICATION RESEARCH. Michael Garstang *et al.* National Research Council of the National Academies of Sciences. National Academies Press, Washington, D.C., 2003.

NOAA's Hurricane Research División: www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq.

La Internet de las cosas

Los principios que dieron vida a Internet nos están llevando a una red de nuevo tipo, que interconecta dispositivos de uso diario: la "Internet-0"

Neil Gershenfeld, Raffi Krikorian y Danny Cohen

En Barcelona, hace cosa de un siglo, Antoni Gaudí concibió un estilo arquitectónico fluido, que integraba sin fricciones aspecto y estructura. Las curvas de sus edificios, llenas de expresividad, no dibujaban meras fachadas ornamentales, sino que respondían también a elementos de la estructura de sostén. Desdichadamente, para la infraestructura electrónica de los edificios no ha llegado todavía una unificación similar. Interruptores, enchufes y termostatos se injertan en la arquitectura como si fuesen ocurrencias de última hora; determina sus funciones un cableado oculto tras las paredes; aparatos y ordenadores parecen intrusos. Ninguno de estos artefactos se comunica con los demás; ni siquiera coinciden en qué hora es.

Sorprende la amplitud de las consecuencias de estas rémoras en la economía de la construcción, la eficiencia energética, la presencia arquitectónica y, en definitiva, la calidad de vida. La construcción mueve en Estados Unidos alrededor de un billón de dólares al año. De ellos, miles de millones se gastan en trazar cableados y en su posterior instalación, mantenimiento y modificación. Con los años, un sinfín de proyectos de "hogares inteligentes" se ha centrado en hallar nuevas aplicaciones de la infraestructura inteligente de los edificios, desdeñando la enorme demanda que existe de equipos que programen los moradores sin que los constructores hayan de fijar de antemano su función.

Ahora bien, cualquier tentativa para atender dicha demanda estará condenada al fracaso si la instalación de una bombilla exige la intervención de un ingeniero experto en redes y su gestión, los servicios del departamento de técnicas de la información de una multinacional. La mejora de la conectividad no precisa ni gigabits por segundo en la velocidad de transmisión, ni de gigabytes de memoria almacenada; el problema consiste, más bien, en todo lo contrario: en rebajar cuanto se pueda el costo y la complejidad de la instalación y configuración de las redes.

Ha ido apareciendo con los años una pasmosa diversidad de estándares destinados a la interconexión de aparatos domésticos; entre ellos, X10, LonWorks, CEBus, BACnet, ZigBee, Bluetooth, IrDA y HomePlug. Recuerda a lo que ocurría hace cuarenta años, cuando nació Arpanet, la red precursora de Internet. Existía entonces una multitud de tipos de ordenadores y de redes; se precisaban equipos electrónicos especiales para tender puentes entre aquellos islotes informáticos, separados por su mutua incompatibilidad.

La solución que permitió la construcción de una red global a partir de redes locales heterogéneas —la interconexión de redes—, se fundó en dos grandes ideas. La primera, la conmutación por paquetes: los datos se trocean en paquetes que pueden enviarse por distintas rutas, según sea necesario, para luego recombinarlos. Este procedimiento se aparta de la metodología tradicional en las redes telefónicas, que dedica un circuito estático a cada conexión. El segundo principio, la regla "de terminal a terminal", dictaba que el comportamiento de la red habría de quedar determinado por los elementos conectados a ella y no por su estructura interna. Esta idea se concreta en el protocolo IP (*Internet Protocol*). Internet ha ido siendo capaz de habérselas con nuevas aplicaciones, como el acceso remoto a ordenadores, el comercio electrónico o el vídeo interactivo. Cada uno de estos servicios introdujo tipos inéditos de datos que habían de transportarse en paquetes, pero su implantación no exigió cambiar ni los equipos, ni los programas de la Red.

Estos principios han llevado a Internet a tres decenios de continuo crecimiento; en ese tiempo ha crecido siete órdenes de magnitud, tanto en prestaciones como

en tamaño: de los 64 sitios de Arpanet a los 200 millones de servidores registrados en la actualidad. Constituyen ejemplos intemporales del correcto diseño de sistemas. Los caracteriza un rasgo importantísimo, a saber, que no exigen unas prestaciones concretas. Con gran esfuerzo y disciplina, se excluyeron de las especificaciones los parámetros que dependieran de la tecnología; así, la evolución de los equipos físicos no obligaría a modificar la arquitectura básica de Internet.

Esas mismas ideas pueden resolver ahora el problema de la conexión de aparatos heterogéneos, como antes resolvieron el de las redes heterogéneas. La ampliación de Internet de modo que pueda controlar hasta una mera bombilla pasa por saber reconocer las semejanzas, así como las diferencias, entre una bombilla y los grandes ordenadores para los que, en sus orígenes, se concibió la Red.



PODRIAN CONECTARSE directamente a Internet aparatos muy sencillos, una bombilla por ejemplo, si se los dotase de circuitos de poco precio que enviasen señales por el cableado eléctrico.

SLIM FILMS

Espacios inteligentes

Encontramos la ocasión, y la demanda, de incorporar Internet a una infraestructura material merced a una serie de instalaciones que realizamos con colegas de diversos lugares. En una exposición de técnicas del futuro, para las celebraciones del cambio de milenio convocadas por la Casa Blanca y el Instituto Smithsoniano, exhibimos un botiquín doméstico inteligente que detectaba envases de comprimidos. El botiquín recordaba a los moradores cuando debían tomar una medicina, hacía saber a la farmacia que había que reponerla y ayudaba al médico a supervisar el tratamiento. Un sistema tal contribuiría al buen cumplimiento de los tratamientos; reduciría así uno de los grandes costos sociales y económicos asociados a la vejez.

Otra instalación, presentada en el Museo de Arte Moderno de Nueva York en 1999, se valía del mobiliario de una exposición para facilitar a los visitantes información sobre los objetos exhibidos. Se quería evitar la intromisión de las típicas interfaces de ordenador en el espacio visual y social de la exposición. En el acto inaugural, un mecenas del museo exclamó: "¡Esto es magnífico! ¡Detesto los ordenadores, y aquí no hay ninguno!". No se percató de que se habían incrustado en el mobiliario nada menos que 17, conectados a Internet y en comunicación con centenares de microordenadores sensores.

Luego se trató de un edificio, parte de la exhibición "La casa mediática", que se celebró en el año 2001 precisamente en Barcelona. Los elementos estructurales no sólo soportaban la carga de esa construcción, sino que canalizaban electricidad y datos. Las luces y los conmutadores contaban con microprocesadores que les permitían interactuar entre sí y con los demás ordenadores de la red. Las asociaciones entre luces y conmutadores se establecían sobre la marcha.

En uno de los actos de inauguración de la casa mediática se encontraba uno de los promotores del proyecto Internet-2 (Internet de gran velocidad), que no paraba de preguntar a qué velocidad era posible enviar datos por el edificio. Cuando alguien le recordó que las bombillas no necesitan ver películas a velocidades de banda ancha, dijo, bromeando, que la red de dispositivos cotidianos formaba parte de una "Internet-0", no de una Internet-2. El nombre tenía gancho, y prendió.

Los procesadores de IP que se prepararon para estas exhibiciones no constituían por sí mismos un proyecto de investigación, pero el reiterado interés que suscitaron desembocó en el lanzamiento del proyecto Internet-0 (I0). Los correspondientes dispositivos se basan en siete principios que, sumados, convierten la inicial interconexión de redes en una interconexión de dispositivos.

La séptuple vía

En primer lugar, cada dispositivo de I0 se vale del protocolo IP. Por el contrario, las muchas técnicas que compiten en la interconexión de dispositivos introducen normas particulares. Cuando un ordenador desea comunicarse con uno de estos dispositivos, hay primero que traducir el protocolo IP de Internet a otro protocolo, tarea que exige una interfaz especial. Los proyectistas adoptaron esta metodología porque estaban convencidos de que resultaría demasiado difícil implantar el protocolo IP en aparatos sencillos. Pero no tiene por qué ser así. El código necesario para operar con IP puede condensarse en unos pocos kilobytes; al sistema le basta un microcontrolador que cuesta 1 euro. La información IP añade unos 100 bits a cada mensaje. De ordinario, carece de importancia en los tiempos de respuesta y en el consumo de energía. A cambio de estos modestos "gastos generales", la red elimina el costo de la configuración y mantenimiento de interfaces complejas.

En segundo lugar, la programación necesaria se ve simplificada al ejecutarse los protocolos de comunicaciones, no por separado, sino al unísono. En un ordenador normal, las tareas asociadas al trabajo en red están rígidamente segregadas. La generación de las señales físicas —los impulsos eléctricos enviados por un cable Ethernet o por un módem telefónico— está gestionada por programas escritos en lenguajes de bajo nivel. La salida del código se envía a un estrato de programas situado a nivel más alto, que codifica o descodifica los datos. Y hay todavía niveles superiores, que supervisan el envío y la recepción de paquetes, que ensamblan o desensamblan los paquetes y que interpretan los estándares correspondientes al contenido de los paquetes. Los datos, finalmente, llegan hasta una aplicación, a un navegador de la Red por ejemplo.

Cada uno de estos estratos se implanta por separado, como si se tratase de una versión informática de una burocracia humana; buena parte del código de los programas se dedica al traspaso de mensajes entre los estratos. Estos niveles constituyen abstracciones útiles para desarrollar los estándares, de manera que se pueda cambiar uno de ellos sin tener que modificar el resto, pero cuando se los ejecuta no es necesario preservar esta generalidad. En un dispositivo I0, los programas sacan partido del conocimiento de la aplicación.

En tercer lugar, dos dispositivos I0 no requieren para funcionar de la existencia de un tercero. La mayor parte de los ordenadores conectados a Internet son clientes (como los navegadores de la Red) o servidores; los clientes de nada sirven sin los servidores. Pero en I0, cada una de las luces y conmutadores almacena los datos y rutinas que necesita, en lugar de depender de un servidor central, que reduciría la fiabilidad y aumentaría los costos. Aunque los servidores potenciarían el valor del sistema —por ejemplo, encendiendo o apagando todas las luces a una determinada hora del día—, no se los necesita para que funcione.

Paraderos

En cuarto lugar, cada dispositivo es responsable del control de su propia identidad. Un ordenador instalado en una red cuenta con cinco nombres: el MAC (Media Access Control, control del acceso a medios) correspondiente a su dirección física en la red local ("00:08:74:AC:05:0C"); una dirección IP en la red global ("18.7.22.83"); un nombre en la Red (www.mit.edu); un nombre funcional ("el tercer servidor desde la izquierda"); y, por último, el nombre de una clave criptográfica que autorice la comunicación segura con el ordenador. Una de las funciones primarias de los servidores es la asignación de nombres. Los dispositivos I0 tienen que ser capaces de gestionar estas funciones por sí mismos cuando no esté presente un servidor, así como de aceptar sus respuestas cuando las haya.

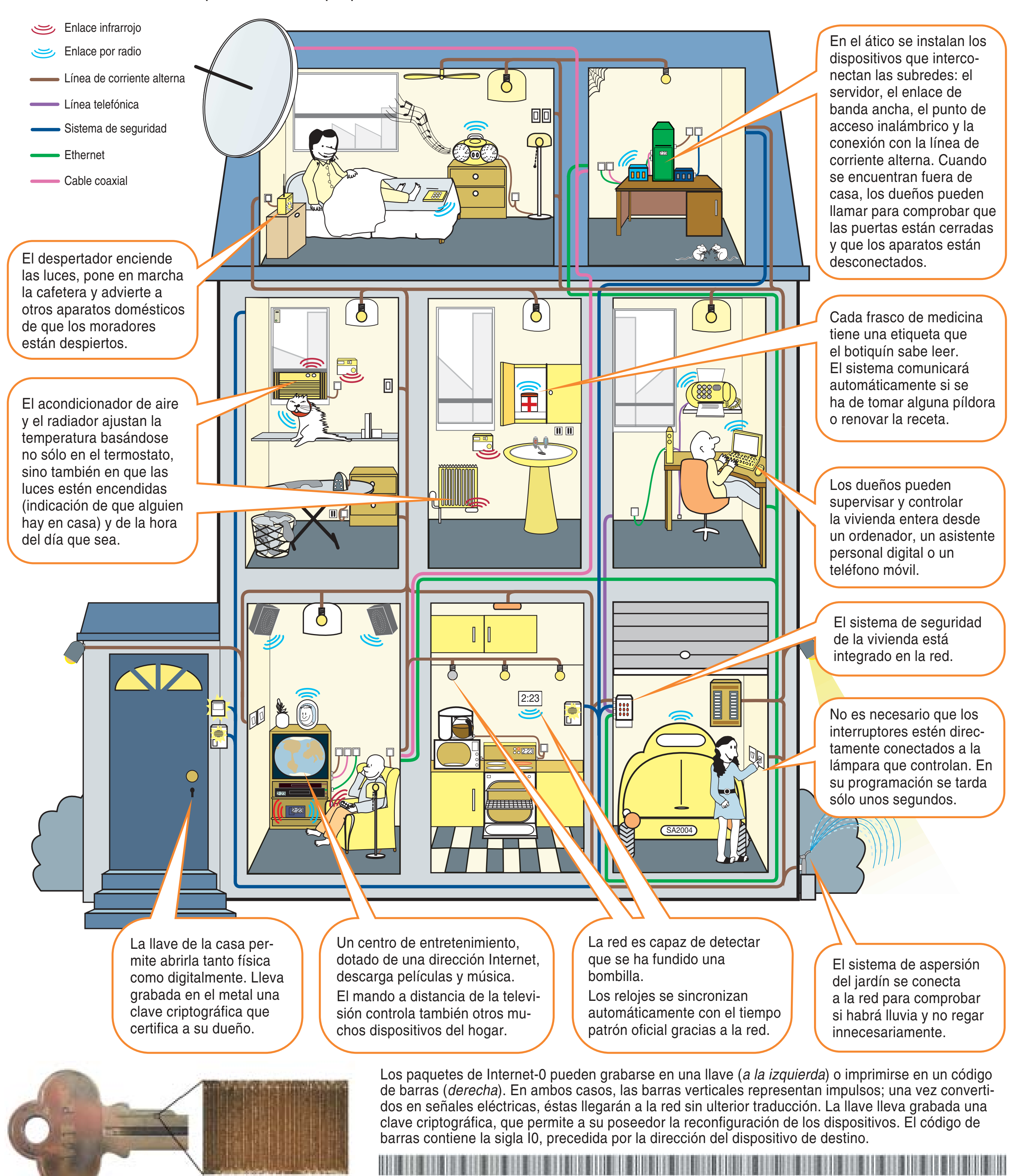
El tipo más común de dirección física se gestiona de forma centralizada mediante la asignación a los fabricantes de bloques de direcciones que inscriben indeleblemente en sus productos. Pero esta clase de coordinación no resultaría factible si hubiese de extenderse a cada lámpara y cada interruptor que se fabricaran en el planeta. Más bien, los dispositivos se limitarían a tomar como dirección propia una cadena de bits elegidos al azar. La probabilidad de que dos dispositivos seleccionen un mismo número de 128 bits, pongamos por caso, es de una parte en 10^{38}. Los usuarios pueden asignar nombres físicos y funcionales por medio de la interacción con un dispositivo. Por ejemplo, podrían pulsar botones de programación en una lámpara y en un interruptor para que difundieran sus respectivas direcciones en sucesión, estableciéndose así una relación de control. O bien, se comunicaría entre los dispositivos, a la vez que la dirección, una clave

Resumen/Internet-Cero

- Que los objetos cotidianos se conectasen a una red de datos reportaría numerosas ventajas: facilitaría la configuración de luces e interruptores en los domicilios, reduciría el costo y la complejidad de la construcción, contribuiría a los cuidados médicos en el hogar. Compiten entre sí muchos estándares; recuerda a los primeros días de Internet, cuando había una multitud de tipos incompatibles de ordenadores y redes.
- Para eliminar esta Torre de Babel tecnológica, el protocolo de datos que constituye el núcleo de Internet podría encargarse de representar la información, cualquiera que sea la forma que ésta tome: impulsos eléctricos, destellos luminosos, pitidos de un altavoz, radiación electromagnética o patrones impresos en papel.
- Gracias a esta forma de codificación, o "Internet-0", la idea inicial de integrar las redes de ordenadores en un todo sin fisuras —el prefijo "Inter" de "Internet"— se generalizaría a redes de cualquier tipo de dispositivo; el nuevo principio recibe el nombre de "inteconexión de dispositivos en red".

Una red que las conecte todas

Internet-0 permite que una miríada de dispositivos se comuniquen entre sí y operen interactivamente: los envases de medicinas encargan a la farmacia la reposición de su contenido; los interruptores y los termostatos se entienden con bombillas y radiadores; desde el trabajo se comprueba cómo está la casa. Las técnicas existentes admiten ya muchas de estas funciones, pero Internet-0 proporciona un estándar único y coherente. Puede manejar información enviada por la línea de corriente alterna, emitida por un enlace inalámbrico o incluso grabada en una llave metálica, y se integra sin fisuras en las redes de ordenadores, tanto locales como globales. Resulta posible configurar los dispositivos interactuando directamente con ellos, sin que medie el teclado de un ordenador.

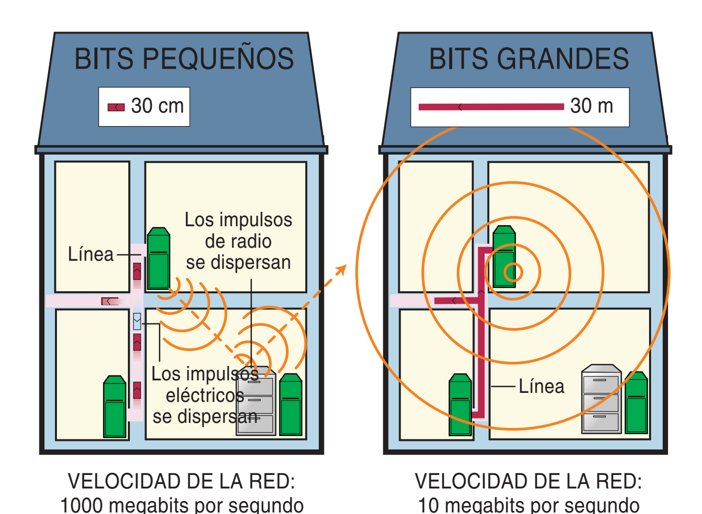


Los paquetes de Internet-0 pueden grabarse en una llave (*a la izquierda*) o imprimirse en un código de barras (*derecha*). En ambos casos, las barras verticales representan impulsos; una vez convertidos en señales eléctricas, éstas llegarán a la red sin ulterior traducción. La llave lleva grabada una clave criptográfica, que permite a su poseedor la reconfiguración de los dispositivos. El código de barras contiene la sigla I0, precedida por la dirección del dispositivo de destino.

MANU PRAKESH (*llave*); LUCY READING (*casa*)

Cuando la lentitud es mejor

Cuando los datos se transmiten despacio, los impulsos correspondientes, eléctricos o de radio, son de gran tamaño, lo que simplifica mucho el funcionamiento de una red informática. Los impulsos pequeños reverberan en las interfases, así en una carcasa metálica (en el caso de las señales de radio) o en un empalme entre cables (en el caso de las señales eléctricas). Los impulsos grandes, en cambio, llenan cada centímetro del aire o del cableado de una vivienda; en consecuencia, con ellos no se requieren concentradores ni otros equipos especiales.



criptográfica para que la conexión fuese segura.

En quinto lugar, I0 utiliza bits mayores que la red. Los bits tienen un tamaño físico, pues no son más que impulsos eléctricos, luminosos o de señales de radio. El tiempo necesario para enviar el impulso, multiplicado por la velocidad a que viaja (cercana, de ordinario, a la velocidad de la luz), es su tamaño. Los bits eran antes mayores que la red por la que se los enviaba. En la actualidad resultan mucho menores: su longitud ronda los 30 cm para velocidades de transmisión de 1 gigabit por segundo. Si el tamaño de la red supera esa longitud, se plantean problemas en las fronteras entre elementos de la red. Incluso ligeros desajustes entre las propiedades de transmisión en esas interfases generan señales espurias. Además, dos ordenadores que empiecen a transmitir simultáneamente pueden no descubrir el conflicto hasta después de haber enviado muchos bits. Tal es la razón de que las redes de gran velocidad exijan cables especiales, concentradores activos, transmisores-receptores ágiles y personal cualificado para su instalación. Pero a 1 megabit por segundo, que viene a ser la velocidad de un cable coaxial doméstico o de una conexión DSL (y que es, sin duda, suficiente para una bombilla), un bit tiene una longitud de 300 metros, lo bastante grande para abarcar toda la red de un edificio. No tiene importancia entonces cómo sean las interfases que pueda contener la red.

Por la senda del telégrafo

En sexto lugar, al utilizar bits grandes resulta posible que los datos que componen un paquete se representen de igual manera, con independencia del medio material que los transporte. Cuando los bits son pequeños, su representación física —su modulación— tiene que adaptarse a cada canal de comunicaciones. La modulación utilizada por un módem telefónico es muy distinta de la correspondiente a un módem de cable coaxial: la línea trenzada del par telefónico difiere del cable coaxial en la amplitud, frecuencia y fase de las señales que puede transportar. Pero cuando los bits son grandes, los detalles de la propagación de cada canal no tienen importancia.

El código Morse saca partido de este principio. Para enviar las señales del código Morse se puede pulsar en un telégrafo eléctrico, lanzar destellos de heliógrafo de unos barcos a otros o golpear en un tubo. Tenemos así canales muy diferentes que, sin embargo, transportan los mismos datos a una misma velocidad de transmisión mediante un mismo sistema de codificación. La información se comunica tan sólo mediante el momento de llegada de un cambio en un medio físico —un salto en el voltaje de la línea telegráfica o la súbita aparición de un sonido—: poco importan la amplitud del salto o el tono del sonido.

La I0 es parecida, excepto en que utiliza impulsos representativos de "0" y "1" en lugar de puntos y rayas. Al igual que los módems actuales, un dispositivo I0 envía los paquetes en forma de ristras de bytes de 8 bits, cada byte enmarcado por bits que denotan su principio y su fin. Un bit 0 está representado por un impulso seguido de una pausa; un bit 1 consiste en una pausa seguida por un impulso; un bit de arranque o de parada está formado por una pareja de impulsos. Este patrón, o codificación Manchester, simplifica la discriminación entre un 0 o un 1 válido y una señal espuria o perdida. Además, la separación entre los impulsos del bit de arranque permite que el receptor mida la velocidad de transmisión; no es preciso que haya sido fijada de antemano. Si se requiere una mayor inmunidad al ruido, el remitente y el destinatario pueden convenir en utilizar un procedimiento que varíe el tiempo de separación entre bytes (como se hace en las radios de banda ultra-ancha); les ayudará a discriminar entre señal y ruido a la vez que retiene la compatibilidad descendente con dispositivos I0 más simples que recurran sólo a los bits enmarcadores.

En tanto los bits se envíen con lentitud suficiente para que sean mayores que la red, la codificación podrá ser la misma para todos los medios físicos de transmisión. Los impulsos podrían viajar por un hilo conductor, acoplarse a la línea de suministro eléctrico, consistir en chasquidos de un altavoz, estar impresos en papel o ir grabados en una llave metálica. Cada uno de estos medios dejaría pasar diferentes partes del impulso: en una línea de suministro de corriente alterna serían eliminadas las componentes de alta

LUCY READING

frecuencia; en la difusión por radio lo serían las de baja frecuencia. Lo único necesario es que algunas de las frecuencias del impulso alcancen su destino. (No obstante, sí será útil el conocimiento detallado de la respuesta de frecuencias si el dispositivo I0 ha de sondear su entorno físico.)

Esta representación generaliza a la modulación el principio "de terminal a terminal" que se aplica en Internet. Cuando un ordenador transmite paquetes mediante el protocolo IP, no necesita conocer nada sobre las redes que transportarán el paquete. Análogamente, cuando un dispositivo utiliza impulsos I0, no ha de saber cuáles serán los medios encargados de portar la señal.

Menos es más

El séptimo y último atributo de I0 es que sus normas son "abiertas", es decir, de libre uso. No debería ser necesario decir que las normas deben estar a disposición de quien desee conocerlas, pero lo es. Muchos de los estándares que compiten para la interconexión de dispositivos no son de libre uso. El sector informático ha recibido una y otra vez la misma lección: que las iniciativas empresariales que dependan de derechos de propiedad deben construirse sobre normas abiertas a todos, y no oponiéndose a ellas.

A modo de ejemplo de la I0 en acción, volvamos al botiquín que se encargaba de administrar la medicación. Nuestro modelo de exhibición se valía de etiquetas identificadoras por radiofrecuencia (RFID) adheridas a los envases de los fármacos —pequeños chips desechables, alimentados por las señales mismas que los interrogan—. Tuvimos que configurar el lector de etiquetas para que supiera lo que debía hacer con los datos que recibía. Otro tanto vale para los sistemas RFID que están siendo desplegados en las cadenas de suministros, tanto civiles como militares: es necesario un ejército de asesores y contratados para configurar todos los lectores RFID.

El proceso se simplificaría mucho utilizando I0. La etiqueta codificaría un paquete IP —al que se podría llamar etiqueta IPID— y el lector sólo tendría que llevar el paquete hasta la red. El paquete podría



PROCESADOR DE INTERNET-0

contener las direcciones de la farmacia y del médico, en lugar de un código preestablecido que el lector tuviese que traducir a nuestra lengua. La información estaría incluida en el frasco de píldoras en vez de programada en el lector.

Si estas características son tan convenientes, ¿por qué no se las ha puesto en práctica ya? El problema reside en que los ingenieros de comunicaciones tienen de antiguo el prejuicio de que el ancho de banda es un bien escaso que debe utilizarse con gran eficiencia. Y así fue en el pasado. A los creadores de la Ethernet original se les reprochó que no alcanzase los límites fundamentales impuestos a la comunicación por la mecánica cuántica. Era cierto, pero irrelevante. Ethernet ha tenido éxito gracias a su relativa sencillez.

Las redes de nuestros días están, en efecto, acercándose a los límites cuánticos, sacrificando la sencillez por ganancias cada vez más impresionantes en las prestaciones. La metodología I0 invierte esta tendencia. Se trata de un ejemplo de técnica en la que menos es más; se sacrifica la velocidad en favor de la interoperatividad.

La I0 se orienta hacia los límites de escala impuestos por la complejidad de la red en lugar de hacia las prestaciones brutas. No tiene el propósito de reemplazar a la Internet existente: proporciona un estrato compatible con ella, que la subyacería. Un dispositivo I0 depende de los enrutadores, pasarelas y servidores de nombres existentes en la actualidad para trasladar paquetes entre las subredes I0. Sin embargo, a lo largo del tiempo la divisoria entre I0 y el resto de la Red podría irse difuminando. Los protocolos que operan en los servidores de Internet, como ocurre con los utilizados para encaminar los paquetes IP hasta su destino, se definen mediante algoritmos: conjuntos de instrucciones para que cada paquete encuentre el mejor camino que puede tomar. Pero los protocolos pueden también entenderse como optimizaciones: formas de hacer uso óptimo de los recursos de comunicación disponibles, dadas sus limitaciones. Investigaciones recientes han revelado cómo resolver tales optimizaciones condicionadas gracias a sistemas distribuidos en vez de por medio de procesadores centrales. Así pues, podría llegar el día en que los nodos I0 se configurasen para resolver problemas de gestión global de la red merced a su comportamiento local, de modo que la arquitectura de nivel superior de Internet emergiese de sus interacciones.

De ser así, el destino último de Internet-0 no sería simplemente el de encender la luz. Una red I0 sería indistinguible de los ordenadores que se encargaría de conectar: sería, propiamente hablando, el ordenador. Los dispositivos de comunicaciones, cómputo, almacenamiento, detección y presentación intercambiasen información —fuese a la vuelta de la esquina o alrededor del mundo— empleando una misma representación. Los componentes de un sistema podrían entonces ensamblarse dinámicamente según dictasen las necesidades de un problema. Ya no los circunscribirían las paredes de una caja.

Los autores

Neil Gershenfeld, Raffi Krikorian y **Danny Cohen** desafían las fronteras tradicionales entre disciplinas. Gershenfeld dirige el Centro de Bits y Atomos del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Krikorian es un doctorando del MIT. El proyecto Internet-0 nació de la colaboración de ambos con Cohen. Amén de ingeniero de Sun Microsystems, fue uno de los padres de Internet.

Bibliografía complementaria

HOW THE INTERNET CAME TO BE. Vinton Cerf en *The Online User's Encyclopedia*. Dirigida por Bernard Aboba. Addison-Wesley, 1993.

WHEN THINGS START TO THINK. Neil Gershenfeld. Henry Holt, 1999.



ORION

Los sondeos del cielo nocturno con detectores digitales panorámicos están revolucionando la astronomía. Desde los Andes venezolanos, un gran "ojo electrónico" contribuye a revelar las primeras fases de la vida de las estrellas

César Briceño Avila

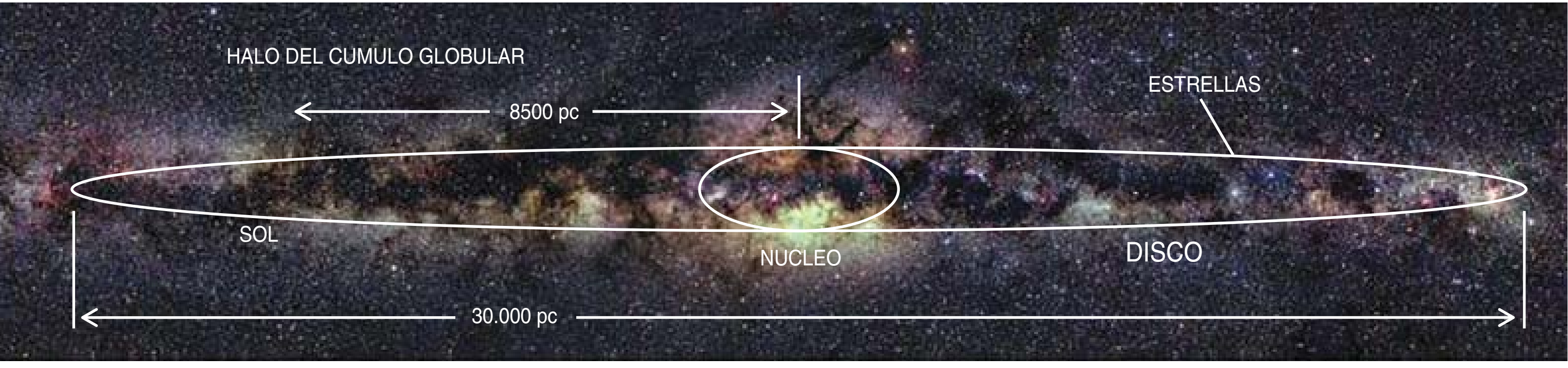
¿De dónde venimos? ¿Cómo se formó nuestro hogar en el cosmos, el pequeño planeta azul que llamamos Tierra? ¿Existen otros planetas que puedan albergar vida? Estas preguntas, tan antiguas como la humanidad misma, surgen de la búsqueda permanente de nuestro lugar en el universo. Nuestras vidas están íntimamente ligadas a las estrellas, a cómo se forman, evolucionan y mueren. La mayoría de los elementos que componen el cuerpo humano se crearon en los hornos estelares. Nuestro Sol, los planetas, la Tierra, sus mares y continentes, montañas, los seres vivos que la habitan, hombre incluido, tuvieron su punto de arranque, en un pasado remoto, en una nube oscura de gas y polvo que constituyó una de las incontables generaciones de estrellas de nuestra galaxia.

La formación estelar ha cautivado la imaginación de la humanidad desde siempre. En el siglo XVI Giordano Bruno, en su trabajo *Del'infinito, universo e mondi*, postuló la existencia de múltiples mundos, habitados por seres inteligentes. Más de un siglo después, en su *Historia Universal* y *Teorías de los Cielos*, Immanuel Kant propuso una descripción sencilla de la formación de los planetas en las estructuras que hoy llamamos discos protoplanetarios. En este artículo mostraremos cómo un novedoso proyecto internacional está abriendo nuevos horizontes en nuestra concepción del origen de las estrellas y los sistemas planetarios.

Incubadoras estelares

Para estudiar el origen y las fases iniciales en la evolución de las estrellas y los planetas, debemos primero identificar los lugares donde nacen y pasan su infancia. Estas "incubadoras estelares" pueblan el disco de nuestra galaxia. Algunas de ellas no distan mucho del sistema solar. Pueden percibirse incluso a simple vista, proyectadas como manchas oscuras sobre el tenue resplandor de la Vía Láctea.

TELESCOPIO SCHMIDT *CIDA*



2. DESCRIPCION ESQUEMATICA de la Vía Láctea. Se indican los componentes que la integran.

En el siglo XVIII William Herschel postuló que estas regiones eran oscuras por la sencilla razón de que carecían de estrellas. Hasta el siglo XX, con la aplicación de la fotografía en astronomía por E. E. Barnard y otros, no empezó a reconocerse que las manchas oscuras de la Vía Láctea constituían vastas regiones de gas y polvo que celaban el brillo de millones de estrellas. Sabemos hoy que esas regiones oscuras, los complejos de nubes moleculares, contienen material suficiente para forjar cientos o varios millones de estrellas como nuestro Sol. Sus dimensiones van de 20 a 100 parsec. Su nombre refleja el gélido frío de su entorno, cuyas temperaturas, de sólo unos 10 grados kelvin, determinan que la mayoría de los átomos del gas se encuentren ligados en moléculas. En los años ochenta y noventa se desarrolló la hipótesis de que tales nubes generaban estrellas en un proceso lento, de hasta 40 o 50 millones de años. Un modelo sometido hoy a revisión.

En los años cuarenta y cincuenta, Alfred Joy y Guillermo Haro notaron que ciertas estrellas proyectadas sobre los complejos de nubes oscuras exhibían características particulares: variaciones súbitas e intensas de brillo, que triplicaba su luminosidad normal; con frecuencia se veían asociadas a nebulosidades brillantes. Las llamaron estrellas ráfaga.

Los primeros análisis espectroscópicos de la composición de la luz de estas estrellas revelaban una emisión intensa de radiación —líneas emisión— en las longitudes de onda (λ), que corresponden al hidrógeno, calcio y helio, entre otros elementos. Recientemente se ha determinado que, en las estrellas en las que se observa la presencia prominente de ciertas líneas de hidrógeno como Hα (λ = 6563 angstrom), esa emisión intensa se origina en el gas que se está transfiriendo de un disco circunestelar hacia la estrella; se calienta por la radiación que ésta emite. Tales estrellas exhibían también una intensa absorción en la línea del Li I (λ = 6707 angstrom). La presencia de esta línea se convirtió en un criterio muy útil para identificar estrellas T Tauri.

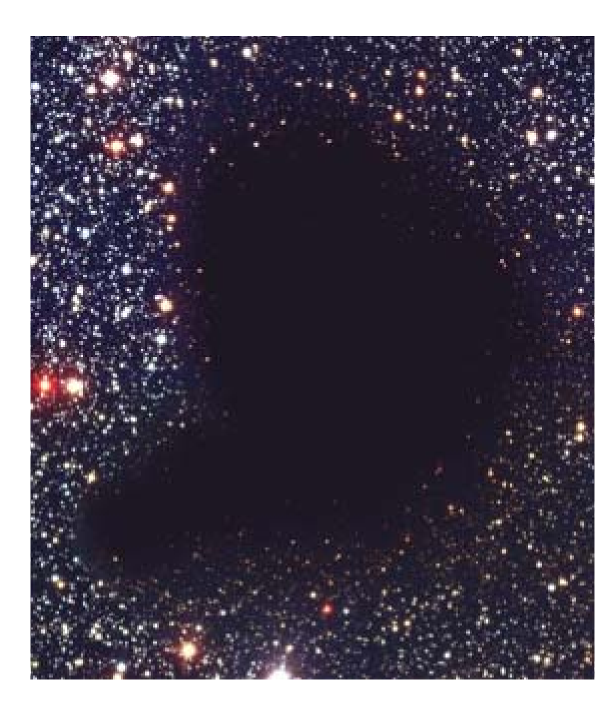
En 1947, Viktor Ambartsumian reconoció que las estrellas ráfaga se encuentran de preferencia en regiones de nubes oscuras. Las llamó asociaciones tipo T, por la estrella T de la constelación del Toro (T Tauri), una de las primeras estrellas ráfaga catalogadas y prototipo de esta nueva clase de objetos. La denominación de estrellas ráfaga terminó por ceder paso al establecimiento de la clase de estrella del tipo T Tauri. Ambartsumian definió también otro tipo de agrupación estelar: las asociaciones OB, constituidas por regiones de nubes oscuras y nebulosas brillantes, iluminadas por estrellas muy masivas y calientes, que se catalogaban, según su espectro, como estrellas tipo O y B. Las asociaciones OB parecen contener un buen número de estrellas T Tauri.

Durante esos años se admitía que las estrellas T Tauri eran estrellas jóvenes, observadas en sus fases tempranas de evolución. En el decenio de los sesenta, parecía claro que los complejos de nubes oscuras constituían los lugares de gestación estelar, pero se desconocía el mecanismo responsable.

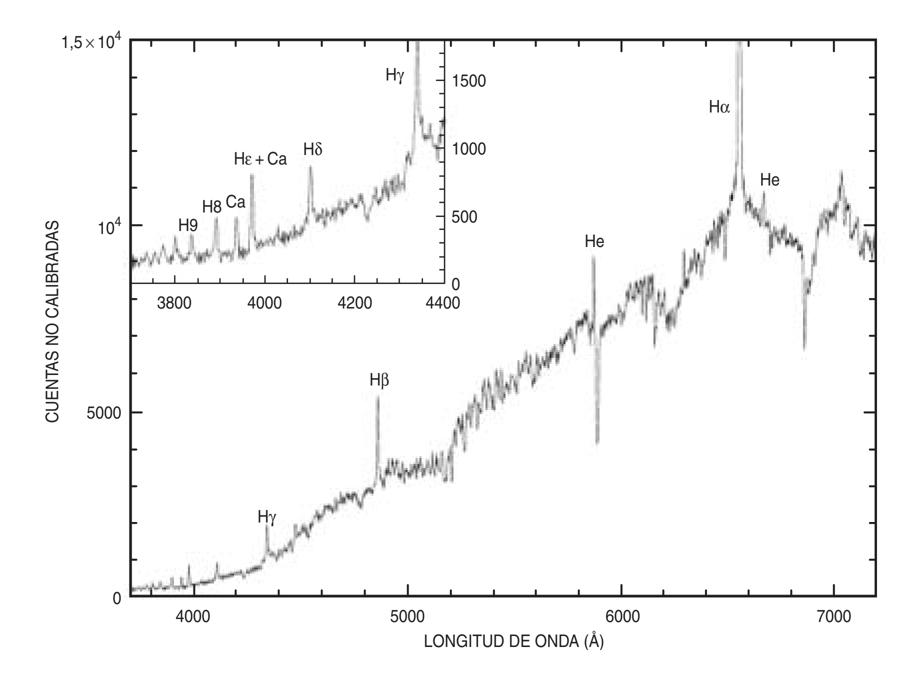
De estrellas a planetas

Con el advenimiento de nuevas técnicas se pudo abordar la formación de estrellas y planetas. En 1983, Bradford Smith y Rich Terrile observaron una estructura que parecía ser un disco de polvo alrededor de la estrella Beta Pictoris, situada a unos 50 años luz. Se trataba de la primera confirmación de la hipótesis de que las estrellas podían estar rodeadas de discos, aunque no había indicios sólidos de que el disco alrededor de Beta Pictoris albergase planetas recién formados.

Por esas fechas, el satélite infrarrojo IRAS (Infrared Astronomical Satellite) revelaba los proce-



3. NUBE MOLECULAR. El gas, frío y denso, vela el brillo de las estrellas de fondo; se nos aparece como una mancha negra.



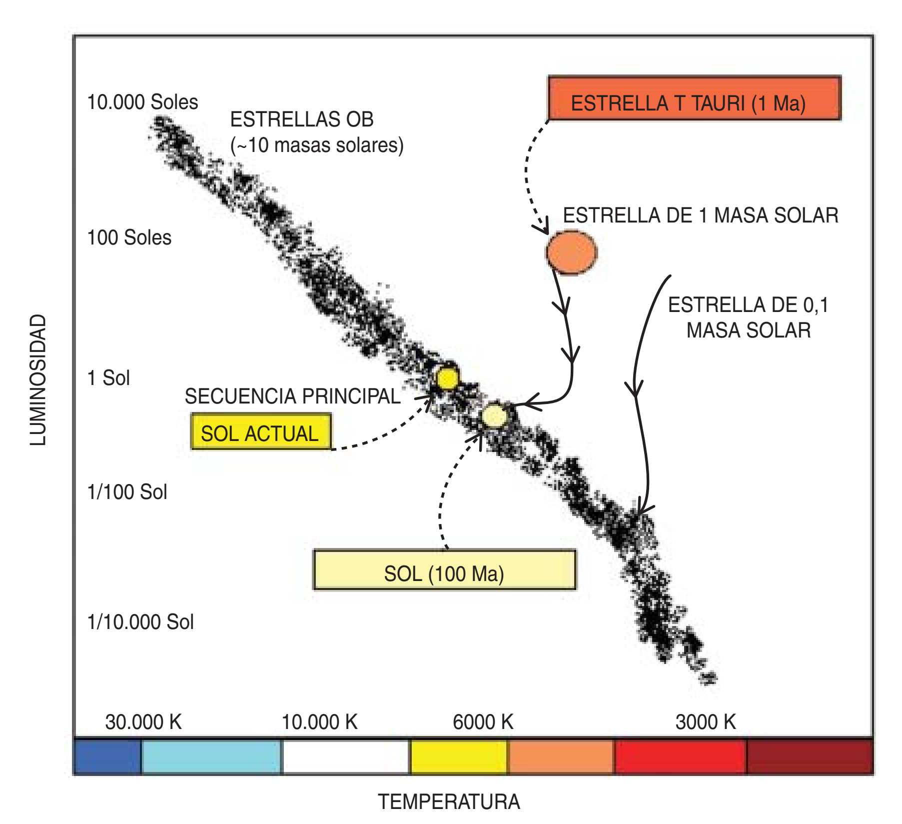
4. ESPECTRO DE LA ESTRELLA AA Tau en la constelación del Toro. Incluida inicialmente entre las estrellas "ráfaga", pasó más tarde al grupo de estrellas T Tauri. Se indican las líneas de emisión de los elementos comunes. Resaltan las del hidrógeno, como Hα, Hβ, Hγ, Hε, Hδ, H8 y H9. Sabemos ahora que estas líneas son manifestaciones del gas que está cayendo desde un disco circunestelar hacia la estrella, que se encuentra en una fase precoz de su evolución.

sos físicos del universo a muy baja temperatura; entre ellos, la emisión de radiación debida al polvo calentado por las estrellas. La sonda espacial mostró que muchas de las estrellas T Tauri poseen excesos de emisión en el infrarrojo (IR), muy por encima de lo que la estrella misma debía emitir en esa región del espectro electromagnético. Se propuso que esta emisión se debía a polvo muy fino en torno a la estrella, que, irradiado y calentado por ésta, reemitía en longitudes de onda largas.

De acuerdo con diversos modelos teóricos, en muchos casos la emisión en el IR sólo quedaba justificada si el polvo se hallaba distribuido en una estructura achatada, a manera de disco. El polvo de la región interna del disco, más cerca de la estrella, se calienta más y emite en el IR cercano (entre 1 y 3 micras), mientras que a radios mayores en el disco, el polvo emite a longitudes de onda mayores. Dado que este exceso de emisión se puede atribuir a un disco que circunda la estrella, las observaciones en el IR aportaban una prueba indirecta de qué estrellas tenían discos y cuáles no.

En los años ochenta y noventa, los satélites de rayos X Einstein y ROSAT (Röntgen Satellite) revelaron que las estrellas T Tauri eran fuentes intensas de rayos X y que había estrellas T Tauri que, si bien emitían en rayos X, no mostraban los atributos originales que definieron a esta clase de objetos: no tenían excesos infrarrojos, no exhibían líneas espectrales en emisión y algunas parecían desvinculadas de nubes oscuras.

Se estableció así una clasificación entre estrellas T Tauri clásicas y T Tauri débiles. Las primeras se caracterizarían por una emisión moderada o intensa en la línea Hα del hidrógeno; las T Tauri débiles tendrían una emisión débil en Hα. Se



5. DIAGRAMA de la luminosidad en función de la temperatura superficial. Se trata del famoso diagrama Hertzsprung-Russell. Arriba, a la izquierda, se encuentran las estrellas más calientes y brillantes (estrellas tipo O y B); las más frías y menos luminosas (enanas tipo M), abajo a la derecha. La franja definida por miles de puntos constituye la región del diagrama donde las estrellas pasan la mayor parte de su vida (su fase "adulta"): estrellas de la secuencia principal.

CESAR BRICEÑO AVILA (*arriba*); ERIC MAMAJEK (PSU) ABRIL 1998 (*abajo*)

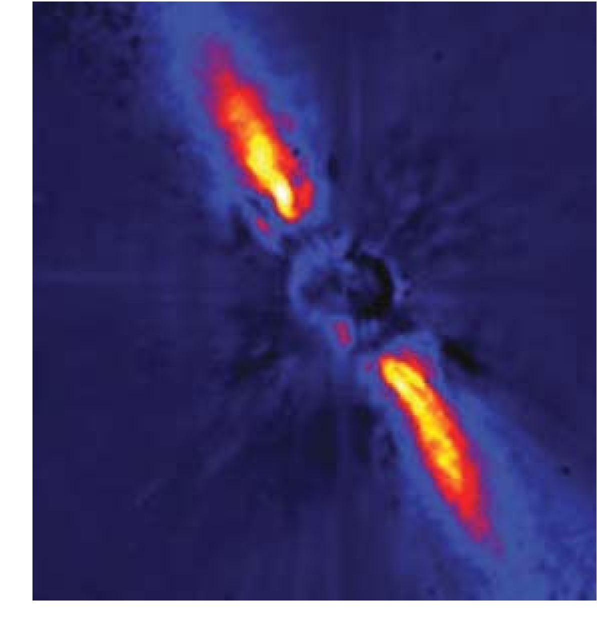
pensó que quizá las T Tauri débiles fueran estrellas jóvenes un poco más evolucionadas, desprendidas de sus discos. Sin embargo, cuando se estimaban las edades para estos objetos, resultaban ser tan jóvenes como sus similares T Tauri clásicas. Se hacía difícil considerarlas contrapartidas evolucionadas de éstas.

Con la puesta en funcionamiento del telescopio espacial Hubble, llegaron las primeras imágenes, espectaculares, de los estadios primigenios de la formación de una estrella. Se confirmó, sin márgen para la duda, que los discos circunestelares eran estructuras características de estas primeras fases evolutivas. En el último decenio del siglo XX se anunció un descubrimiento crucial: un planeta que giraba alrededor de una estrella distinta del Sol. Con ello se abría una expectativa excitante: si existían planetas alrededor de otras estrellas, cabía la posibilidad de que hubiera vida en otros rincones del universo. Hoy en día la cifra de planetas extrasolares supera los 100, en órbita alrededor de unas 79 estrellas.

Orión

Entre las primeras asociaciones OB en catalogarse figura Orión OB1, que abarca la mayor parte de la constelación de Orión. Comprende una de las regiones de formación de estrellas más activas y cercanas a nuestro sistema solar (a una distancia de 400 parsec o ~1200 años luz). Orión, el Gran Cazador o Guerrero de los Cielos, puede verse desde casi cualquier punto de la Tierra. En el hemisferio norte, Orión señalaba la llegada del invierno y luego, al desaparecer por el oeste hacia abril, la venida de la primavera.

Orión puede revelarnos los misterios y secretos de la génesis estelar. Enmarcadas por Rigel y Betelgeuse, estrellas brillantes, se agrupan en línea recta tres estrellas: el cinturón; otras tres, más débiles y juntas entre sí, en un ángulo casi recto con las primeras, dibujan la espada del cazador. Si observamos este segundo trío con un telescopio, o incluso con unos buenos binoculares, apreciaremos que la "estrella" del centro no es tal, sino una enorme nube luminosa de gas y polvo: la famosa nebulosa de Orión o M42.



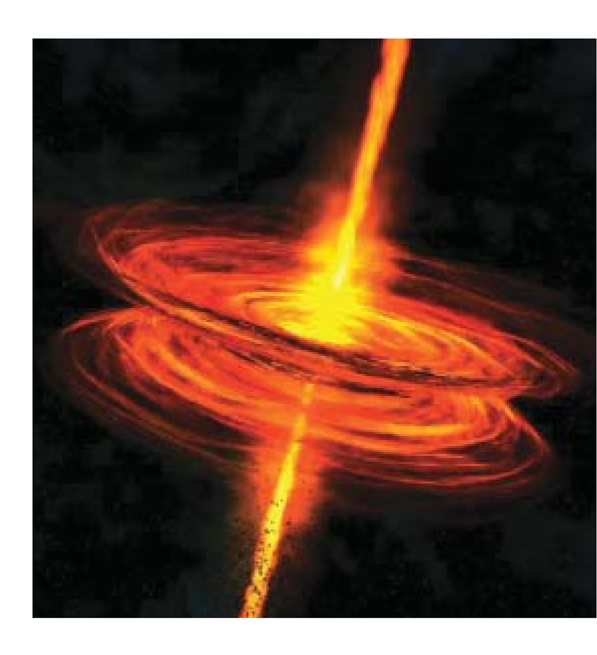
6. IMAGEN DE LA LUZ reflejada por el disco (visto de canto) alrededor de la estrella Beta Pictoris..

Sin embargo, M42 constituye una pequeña mancha brillante en la superficie de un vasto complejo de nubes de gas molecular y polvo, cuya presencia detectamos gracias a la radiación que emiten en longitudes de onda infrarrojas (IR, $\lambda = 1 - {\sim}300$ micras) y de radio ($\lambda > 300$ micras).

En el centro de la nebulosa, un grupo de cuatro estrellas jóvenes (< 1 millón de años) y calientes, del tipo O y B, inyectan gran cantidad de radiación ultravioleta en el gas, éste se ioniza y emite luz, creando la "nebulosa de Orión". Pero estas cuatro estrellas no son más que la punta de lanza de una de las agrupaciones de estrellas más densas y numerosas de nuestro rincón de la galaxia, el cúmulo del Trapecio. El cúmulo consta de unas 10.000 estrellas jóvenes de baja masa (de ~1 a 0,1 masas solares), apiñadas en un volumen tan exiguo, a escalas interestelares, que la distancia promedio que separa cada par de estrellas es igual a la distancia Sol-Urano (unas 20 unidades astronómicas).

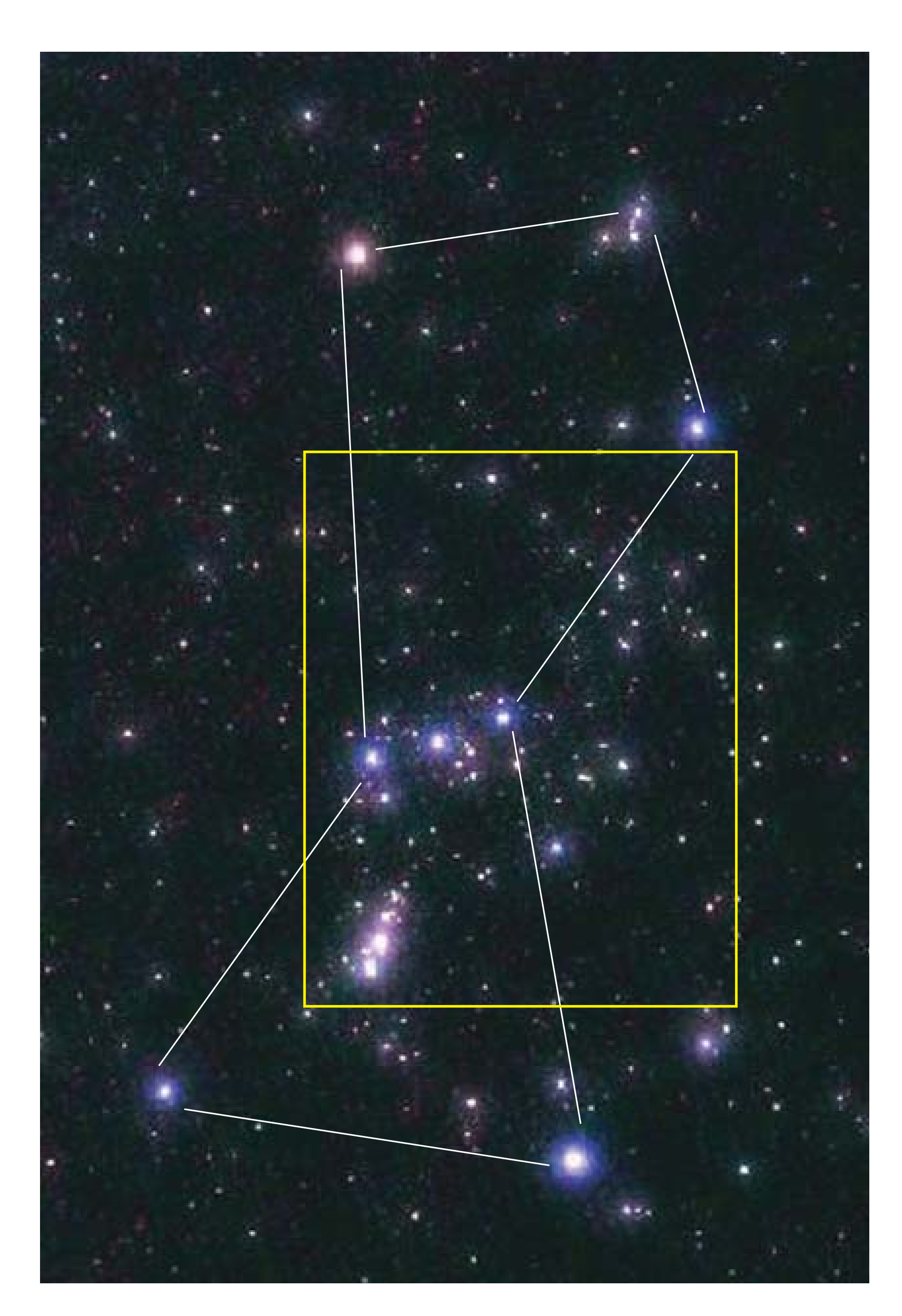
La región del cúmulo y nebulosa de Orión ha sido una de las incubadoras estelares más estudiadas por los astrónomos en su búsqueda de una explicación de la formación de sistemas planetarios a partir de una gran nube de gas y polvo. En años recientes, las observaciones en las longitudes de onda correspondientes a los rayos X (~15-150 angstrom), en el rango visible (3500-9000 angstrom) e IR (1-20 micras), han demostrado que esta zona engendra estrellas a un ritmo acelerado. Los datos aportados por los telescopios terrestres y el Hubble han revelado discos de gas y polvo alrededor de muchas de estas estrellas recién nacidas. Se cree que los discos en cuestión, que cumplen un papel fundamental en la nutrición de la estrella embrionaria, constituyen también los progenitores de los sistemas planetarios. La frecuencia con que aparecen tales discos abona la idea de que la formación de planetas pudiera constituir un fenómeno bastante común.

Pese a todos estos descubrimientos y avances, quedan por aclarar muchos aspectos del origen de los planetas y las estrellas. ¿Cómo se dispersan las estrellas jóvenes formadas en un cúmulo, así el de la nebulosa de Orión, para integrar la población de estrellas que conforman el disco de la Vía Láctea? ¿Cuánto duran los discos alrededor de las estrellas recién engendradas? ¿Cuánto las nubes moleculares?



7. REPRESENTACION ARTISTICA de una estrella T Tauri. Desde la estrella del centro salen chorros de material. La parte interna del disco, calentada hasta unos 1000 grados kelvin por la estrella, emite intensamente en el infrarrojo.

© J. L. BEUZIT *et al.* (*Observatorio de Grenoble*), ESO (*arriba*); RYAN BLISS (http://www.digitalblasphemy.com) (*abajo*)



8. LA CONSTELACION DE ORION, indicada por las líneas en blanco. El recuadro amarillo señala la zona estudiada en el sondeo de variabilidad en Orión.

FRANCO DELLA PRUGNA (CIDA)

Las observaciones de algunas estrellas, bastante jóvenes, de la vecindad de nuestro Sol sugieren que, luego de unas decenas de millones de años, se disiparían el gas y el polvo de los discos circunestelares, convertidos quizás en materia prima para la formación de planetas. Pero estas conjeturas descansan sobre medidas provenientes de unas pocas estrellas. Según otros modelos teóricos, la gestación de un planeta requeriría decenas de millones de años. La duración del proceso sigue siendo materia de debate.

Para dar respuestas más firmes a estos y otros interrogantes, habrá que acometer observaciones a gran escala de regiones muy extensas, a la vez que un poco más evolucionadas (con edades de entre 3 y 10 millones de años), y no limitarnos al estudio de cúmulos muy jóvenes y compactos, como el del Trapecio, que sólo nos muestran un aspecto muy precoz en la formación y evolución inicial de estrellas y sistemas planetarios.

Formación estelar en Orión

De entrada nos encontramos con un problema espinoso: la identificación de las poblaciones de estrellas menos jóvenes, con edades de entre 3 y 10 millones de años. Dispersadas ya de sus lugares de origen, se extienden sobre áreas muy grandes del cielo; las nubes progenitoras se han disipado, con lo que se ha perdido el referente de la localización. Para buscar e identificar estas estrellas, hemos de realizar sondeos sistemáticos a gran escala.

Hacia finales de los años ochenta y principios del decenio siguiente, se rastreó una zona extensa en Orión. Se utilizó un telescopio Schmidt, dotado de un prisma objetivo, para identificar estrellas T Tauri clásicas por su fuerte emisión en la línea Hα del hidrógeno. El inconveniente de esta técnica radica en que no todas las estrellas T Tauri muestran una emisión intensa en Hα como las T Tauri clásicas; además, éstas suelen encontrarse en las nubes moleculares y nebulosas brillantes, o en sus alrededores, es decir, en las regiones más jóvenes. Añádase el margen no despreciable de detecciones falsas que consiente el método.

Otros estudios acudieron a los datos del satélite ROSAT en su búsqueda de estrellas T Tauri (emisoras de rayos X) en un área de Orión de muchos grados cuadrados. Pero esta técnica se resiente de una incapacidad para detectar las estrellas T Tauri menos masivas (más débiles en rayos X). Además, la selección a partir de la emisión en rayos X incluía muchas estrellas más viejas (hasta de 100 millones de años) sin parentesco con Orión, aunque emitían rayos X.

Por esa gavilla de razones, las investigaciones no lograron identificar un número significativo de estrellas jóvenes de 3 a 10 millones de años que se suponía dispersas en todo Orión OB1.

Sondeo de variabilidad

Para identificar las estrellas jóvenes de baja masa dispersas en Orión OB1, paso previo para el estudio de la historia de la formación de estrellas y planetas, un equipo de in-

vestigadores integrado por el autor junto con Nuria Calvet y Lee Hartmann, del Observatorio Smithsoniano de Astrofísica, y Katherina Vivas, del Centro de Investigaciones de Astronomía de Venezuela, está llevando a cabo lo que probablemente sea el sondeo sistemático más extenso realizado hasta ahora en una asociación OB. Lo hemos podido acometer gracias a la conjunción de varios factores.

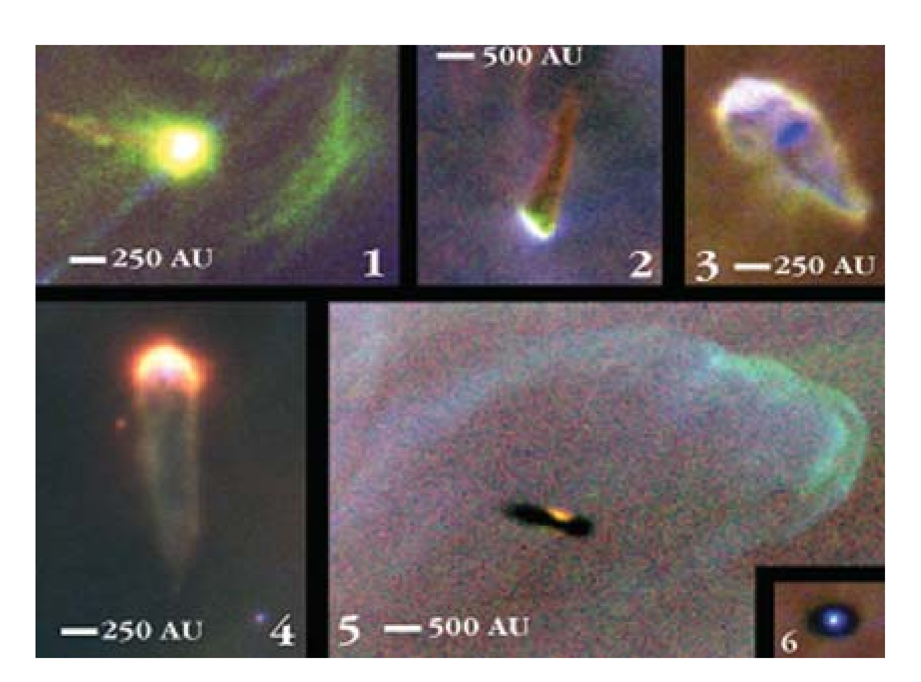
Primero, la disponibilidad de un telescopio de campo amplio. El Schmidt de 1 metro de apertura del Observatorio Astronómico Nacional de Venezuela está dotado de una cámara digital de técnica novísima, capacitada para realizar sondeos sistemáticos y uniformes de grandes zonas del cielo; teníamos, además, acceso franco a telescopios en Estados Unidos equipados con espectrógrafos apropiados para seguir un número considerable de candidatas detectadas con el telescopio Schmidt. Segundo, gracias al método de observación en "modo servicio", se han obtenido en un tiempo razonable el número ingente de observaciones que este proyecto requería.

Variabilidad estelar

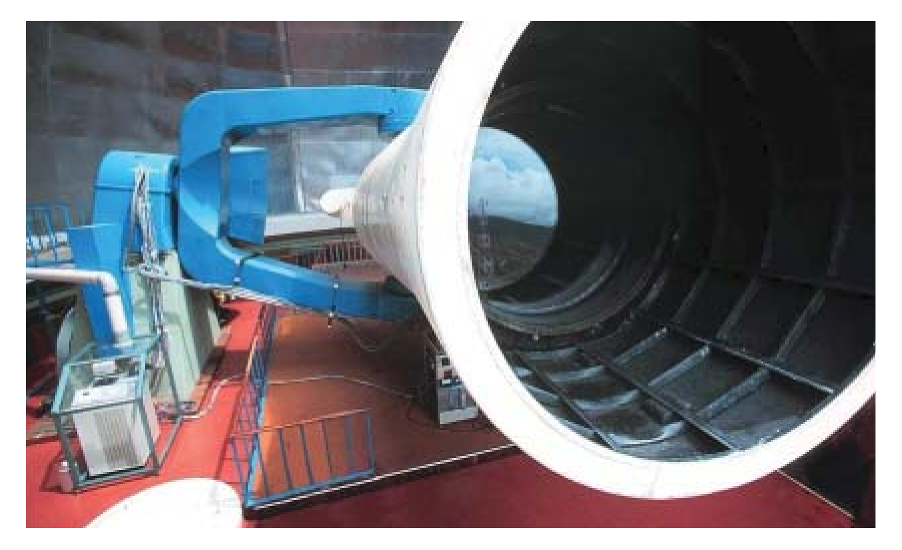
Aparte de contar con las herramientas adecuadas, el tercer factor, clave para el éxito de la investigación, ha sido la combinación de una técnica eficiente para detectar candidatas a estrellas jóvenes de baja masa, o estrellas T Tauri: la variabilidad estelar, con métodos espectroscópicos apropiados para cribar las muestras de candidatas.

Según dijimos, caracteriza a las estrellas T Tauri su luminosidad variable. Tales variaciones de brillo obedecen a diversos procesos. Pueden crearlas enormes manchas producidas por intensos campos magnéticos que cubren buena parte de la superficie de la estrella y, en el curso del giro de ésta, pasan por la línea visual. (Un fenómeno parecido al de las manchas solares.) Emergen también violentas fulguraciones, causadas por eyecciones de material, acompañadas de fuertes destellos. Si la estrella está rodeada de un disco de gas y polvo, el material que cae de éste a la estrella choca contra su superficie. En estas regiones de choque, la temperatura se eleva hasta formar una "mancha caliente", mucho más brillante que el resto de la superficie estelar. Al rotar la estrella, las manchas brillantes pasan frente a la línea visual, ocasionando de nuevo variaciones de brillo.

Todos estos factores pueden combinarse al mismo tiempo para crear patrones de variación de luz muy complejos. Estas variaciones, cuando presentan un comportamiento periódico, se repiten en escalas de tiempo que van desde un día o dos a poco más de diez días.



9. IMAGENES OBTENIDAS con el telescopio espacial Hubble. Se distinguen discos y envolventes de gas y polvo alrededor de estrellas muy jóvenes en la región de la nebulosa de Orión. Las barras de escala están en unidades astronómicas. Estos discos de gas y polvo tienen dimensiones mucho mayores que nuestro sistema solar. (La distancia del Sol a Plutón es de unas 50 unidades astronómicas.)



10. TELESCOPIO SCHMIDT de 1 metro del Observatorio Nacional de Venezuela. La lente correctora, instalada cerca del extremo superior del tubo, mide 1 metro de diámetro. En azul se observa la montura de doble horquilla y el pilar de apoyo que apunta al norte. Al pie del pilar está el equipo de refrigeración de la cámara de mosaico con dispositivo de acoplamiento de carga.

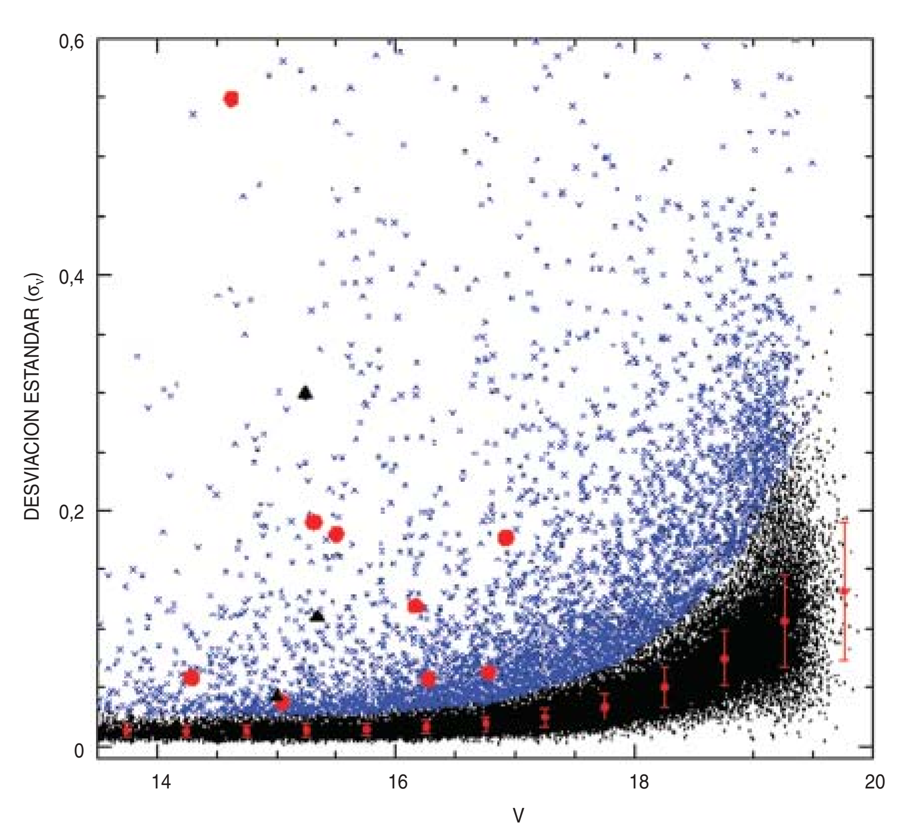
Pese a su importancia, durante mucho tiempo no pudo recurrirse a la variabilidad para detectar estrellas T Tauri. No podía medirse de manera fiable el brillo estelar en placas fotográficas. Aunque se desarrollaron cámaras digitales con detectores de acoplamiento de carga, que permitían precisar el brillo de diversas estrellas a la vez, estos dispositivos cubrían áreas demasiado limitadas y no podían aplicarse en sondeos a gran escala. La disponibilidad de la cámara de mosaico con acoplamiento de carga en el telescopio Schmidt del Observatorio Astronómico Nacional de Venezuela ofrecía la posibilidad de plantear un rastreo de variabilidad a gran escala.

A diferencia de la emisión intensa en Hα, la variabilidad es una propiedad compartida por todas las estrellas T Tauri. Se evita así el sesgo hacia determinado tipo de estrellas jóvenes. Además, tiene una ventaja sobre los sondeos a gran escala en rayos X realizados con ROSAT: el nuevo método está capacitado para detectar estrellas mucho menos masivas (de brillo mucho más débil), las más numerosas también, por lo que uno espera que la muestra resultante sea estadísticamente más completa.

Espectroscopía

El que nuestra técnica sea sensible a las estrellas T Tauri de menor masa comporta otra ventaja implícita. Debido a su baja masa, el interior estelar se halla en un estado convectivo; las celdas de convección, o burbujas, de gas se calientan, ascienden, luego se enfrían cerca de la superficie y descienden para repetir el ciclo. Puesto que el interior de la estrella es mucho más caliente (unos millones de grados comparados con 3000-4000 ºK en la superficie), algunos elementos ligeros pueden "quemarse" eficientemente en su curso hacia el interior estelar y sufrir allí reacciones termonucleares. Sucede así con el litio (Li I), que a temperaturas de unos 2,5 millones de grados se transforma en helio.

En virtud de ese proceso, las estrellas T Tauri de menor masa queman su dotación de Li I primordial en menos de 15-20 millones de años, antes de llegar a su fase adulta, por lo que la presencia de una línea de Li I en 6707 angstrom, fuertemente en absorción, constituye un indicador inequívoco de la juventud de una estrella de baja masa.



11. DIAGRAMA DE LA DESVIACION ESTANDAR (σ_V) en función del brillo (en el filtro visual V), de 16 medidas de luminosidad para cada uno de 50.000 objetos en un barrido parcial de Orión. Cada punto representa el valor σ_V de todas las medidas de cada objeto. Se usa la escala de magnitudes habitual en astronomía: una magnitud V mayor designa un brillo menor. La mayoría de las estrellas (*puntos negros*) no varían de brillo; su distribución representa los errores de medida en sus magnitudes, indicados por las barras verticales rojas (las estrellas más débiles, a la derecha, tienen errores mayores). Los símbolos azules representan objetos cuya desviación σ_V se aparta significativamente por encima del error de medida; corresponden a los objetos que se identifican como variables. Los puntos rojos y triángulos negros indican las estrellas T Tauri catalogadas de antemano; todas son detectadas como variables por nuestros algoritmos, lo que corrobora la fiabilidad del método que hemos seguido.

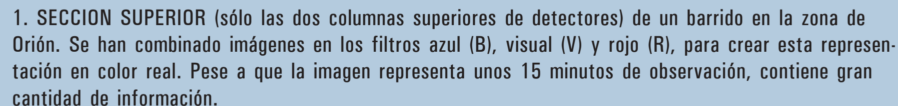
De la idea a su ejecución

Para acometer un sondeo de variabilidad, se requiere reunir al menos tres medidas del brillo de cada estrella, en momentos distintos. En la práctica, sin embargo, nos vemos condicionados por diversos factores: a veces, una misma estrella puede caer en partes defectuosas del detector y las estrellas T Tauri varían de brillo en escalas temporales que van de 1-2 días a unas 2 semanas. Por eso, es necesario observar cada zona del cielo entre cinco y ocho veces, para así maximizar la probabilidad de detectar la mayoría de las estrellas jóvenes de esa región.

Desde noviembre de 1998 hasta marzo de 2003 se realizaron unas 160 observaciones de 6 franjas, cada una de 2,3º × 15º; se abarcó un total de casi 200 grados cuadrados en Orión. Hasta el momento, sólo se ha analizado e interpretado una fracción de estos datos. Nos ceñiremos aquí a los resultados que hemos obtenido para las dos primeras franjas observadas en el proyecto. Ahora bien, aunque parciales, estos resultados nos revelan aspectos fundamentales del proceso de formación de estrellas y sistemas plane-

CESAR BRICEÑO AVILA

CAMARA DE MOSAICO CON DISPOSITIVO DE ACOPLAMIENTO DE CARGA





1. SECCION SUPERIOR (sólo las dos columnas superiores de detectores) de un barrido en la zona de Orión. Se han combinado imágenes en los filtros azul (B), visual (V) y rojo (R), para crear esta representación en color real. Pese a que la imagen representa unos 15 minutos de observación, contiene gran cantidad de información.

2. LA NEBULOSIDAD más brillante es NGC 2068, una pequeña zona donde acaba de nacer un grupo de estrellas e iluminan el gas y el polvo que las circundan. También se aprecian sutiles retazos de gas y polvo dispersos por la imagen, indicio de que nos hallamos en una región donde las estrellas dan los primeros hálitos de vida.

LA CAMARA DE MOSAICO con dispositivo de acoplamiento de carga (CCD) del Observatorio Astronómico Nacional de Venezuela consta de 16 detectores CCD de 2048×2048 píxeles cada uno, para un total de unos 64 millones de píxeles. Se la proyectó para operar en modo "barrido", es decir, para generar imágenes del firmamento en forma de tiras continuas, simultáneamente en 4 filtros.

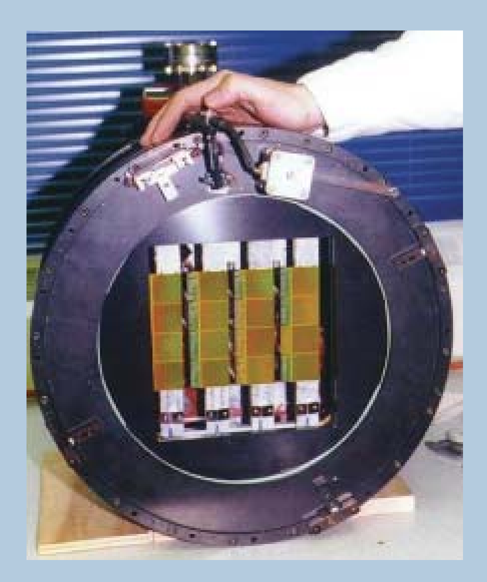
Cada columna de 4 detectores del panel izquierdo de la figura 3 abarca 2,3º sobre el cielo. Como se aprecia a la derecha, cada columna puede ser dotada de un filtro diferente, para aislar un rango dado de longitudes de onda. Las estrellas se mueven a la velocidad sideral, cruzando en secuencia cada filtro (*de izquierda a derecha en la figura*). Cada columna con su filtro genera una imagen digital del firmamento en forma de tira o banda, tan larga cuanto dure el trabajo del equipo. El tiempo de exposición efectivo para cada estrella queda fijado por el tiempo que tarde en cruzar cada detector (unos 140 segundos en el ecuador celeste).

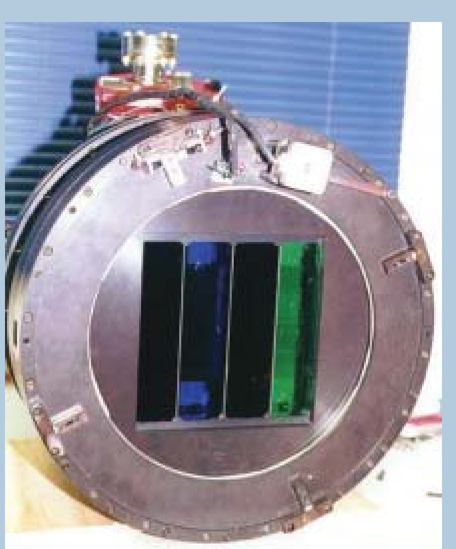
Se trata de una forma óptima de observar zonas muy extensas del cielo de manera continua, pues se captan imágenes a una razón de 34º cuadrados por hora en cada filtro; las imágenes se graban en el computador en tiempo real. En una noche continua de observación se generan aproximadamente 36 gigabytes de datos. Del procesamiento de esa enorme cantidad de información se encargan cuatro computadores que se conectan a uno central, que a su vez coordina las comunicaciones entre máquinas y presenta al observador la interfaz para el control de la cámara.

A modo de comparación, en el modo habitual de observación se apunta hacia una región dada y allí se inicia una exposición de cierta duración (mientras el telescopio rastrea el movimiento de las estrellas mediante su mecanismo de seguimiento sideral). Acabada la exposición, se leen los CCD, luego se apunta hacia otro sitio y se realiza una nueva exposición. La técnica tradicional implica, pues, pérdidas de tiempo en cada reposicionamiento y la demora de la lectura de los CCD.

Las limitaciones del modo barrido se reducen a dos fundamentales. En primer lugar, si nos interesan objetos más débiles que los menos brillantes que vemos en una tira, debemos combinar varios barridos. En segundo lugar, el diseño de la cámara acota la zona del cielo en la que pueden obtenerse imágenes de calidad óptima a una franja entre 6º al norte y 6º al sur del ecuador celeste. Más allá de estos límites las imágenes estelares empiezan a elongarse, porque las estrellas no recorren líneas rectas sobre las cuadrículas de píxeles de los detectores, sino que describen arcos de circunferencias, más fuertes cuanto más alejadas (al norte o al sur) estén del ecuador celeste.

Sin embargo, las ventajas sobrepasan con creces estas limitaciones. Gracias a ello, este equipo, uno de los dos existentes en el mundo, ha permitido desarrollar sondeos sistemáticos del cielo ecuatorial, a una escala sin precedentes.





3. CAMARA DE MOSAICO con dispositivo de acoplamiento de carga instalada en el telescopio Schmidt. A la izquierda, se distinguen los 16 detectores dispuestos en una matriz de 4×4. A la derecha, se muestran 4 filtros instalados frente a cada una de las 4 columnas de detectores.

CESAR BRICEÑO AVILA (*arriba*); DPTO. DE FISICA, UNIVERSIDAD DE YALE (*abajo*)

tarios en esta región durante los últimos 10 millones de años.

Para procesar los 860 gigabytes de información registrados con la cámara de mosaico con dispositivo de acoplamiento de carga, contamos con software especialmente desarrollado para este fin por la colaboración QUEST; los catálogos resultantes contienen posiciones y medidas de brillo para cientos de miles de objetos. Esta información es usada por programas desarrollados por nuestro grupo para aplicar tests estadísticos que determinarán cuáles objetos muestran variaciones en su brillo y cuáles no.

Tras un primer muestreo de candidatos, se procede a seleccionar, de entre los objetos marcados como variables, aquellos cuyo color y brillo promedio son coherentes con los característicos de estrellas T Tauri, en una gráfica del brillo en función del color. Las estrellas T Tauri se distribuyen en una región particular de este diagrama, por encima de la secuencia principal. De ello se infiere un listado más riguroso de candidatos, que se observan luego con espectrógrafos para confirmar si son o no estrellas T Tauri, según la presencia de la línea de Li I (6707 angstrom) en absorción. Los espectros nos permiten además determinar parámetros fundamentales de cada estrella; por ejemplo, su temperatura superficial.

Comparando el número inicial de estrellas candidatas con las estrellas jóvenes de baja masa que resultan del análisis espectroscópico, hemos encontrado que nuestro método de selección es fiable y eficiente: entre un 50 % y un 70 % de las candidatas resultan ser estrellas T Tauri. Merced a este alto rendimiento, podemos ir construyendo un censo preliminar en un área 30 veces mayor a la estudiada hasta ahora.

En las dos primeras franjas que hemos analizado se han descubierto más de 200 estrellas jóvenes, en una zona donde sólo se conocían 15 objetos de este tipo. Podemos ya empezar a estudiar la evolución estelar en Orión OB1 y estructuras similares.

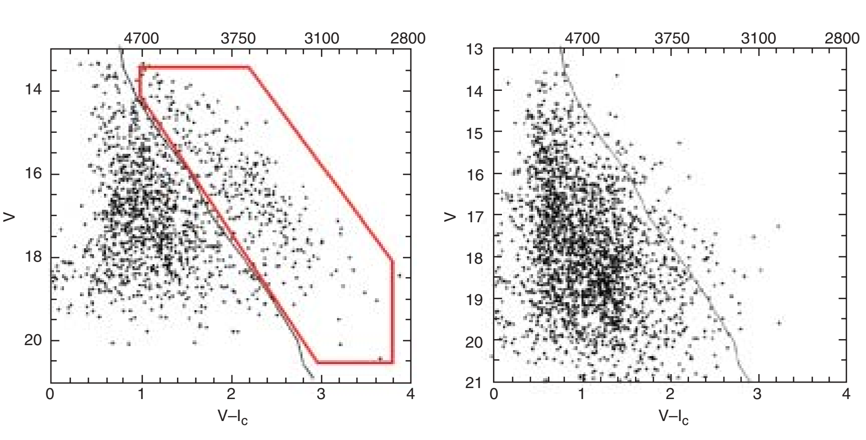
Registro fósil de la génesis estelar

Las estrellas T Tauri clásicas se concentran alrededor de las tres estrellas del cinturón de Orión, la mayoría circunscritas al polígono que abarca la zona OB1b. En cambio, las estrellas T Tauri débiles se distribuyen de manera amplia sobre toda el área que abarca las dos franjas analizadas. La subasociación OB1b tiene una edad aproximada de unos tres millones de años, mientras que la región OB1a, mucho más extensa, ronda los 10 millones.

Recordemos que la emisión intensa en Hα en las T Tauri clásicas proviene del gas caliente que cae del disco hacia la estrella. El que estas estrellas dotadas de discos internos se concentren en OB1b, la región más joven, mientras que OB1a está poblada por estrellas sin indicios de discos que transfieran material a su estrella progenitora, da a entender que los discos circunestelares, al menos la parte más interna de los mismos, deben durar menos de 10 millones de años.

El análisis de la emisión en el infrarrojo cercano de las nuevas estrellas corrobora nuestra tesis. De cada nueva estrella T Tauri identificada, extrajimos las medidas de brillo en los filtros infrarrojos J (1,25 micras), H (1,65 micras) y Ks (2,2 micras) de la base de datos del "Sondeo general en 2 micras del firmamento" (2MASS). Resultó patente que las T Tauri en OB1a carecen de excesos en el infrarrojo, mientras que una fracción de las de OB1b muestran excesos en el color H-Ks; además, éstas son las mismas que muestran Hα intensa.

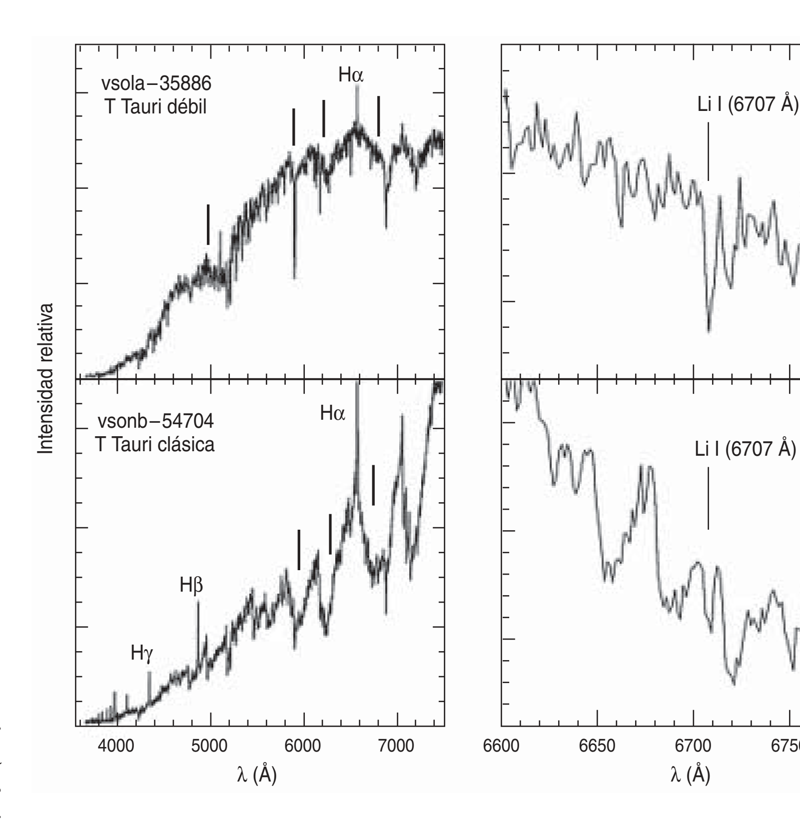
Si comparamos nuestros resultados con la fracción de estrellas con discos en regiones muy jóvenes, por ejemplo, con el cúmulo de la nebulosa de Orión (~1 millón de años), vemos que en OB1b ese número ha decaído sensiblemente. ¿Cómo explicarlo? Transcurridos pocos millones de años, buena parte, si no todo el material del disco circunestelar se ha disipado ya sea por evaporación del gas y polvo, ya sea por su aglomeración y concentración para formar planetesimales o planetas. En cualquier caso, la formación de planetas debe ocurrir antes de que se agote la materia prima del disco; un proceso, pues, bastante rápido, de unos 10 millones de años. Ello nos permite introducir una cota superior en los modelos teóricos; quedan descartados, por ende, los planteamientos que requieran decenas de millones de años para formar planetas.



12. LA UTILIDAD DE LA VARIABILIDAD para seleccionar estrellas jóvenes. A la izquierda se muestra el diagrama V en función de V-I para objetos variables en un barrido sobre el cinturón de Orión. Se trata de una región donde se ha producido una formación reciente de estrellas y donde, por tanto, se espera un número apreciable de estrellas T Tauri. En efecto, el locus (*polígono rojo*) sobre la secuencia principal (*línea negra continua*) donde deben aparecer las candidatas a estrellas T Tauri, se encuentra muy poblado. Contrasta ello con el "campo control", alejado de Orión, que se muestra a la derecha; allí apenas hay objetos variables por encima de la secuencia principal. En el eje vertical el brillo aumenta hacia arriba (la magnitud es menor); en el eje horizontal el color V-I se hace más "rojo" hacia la derecha. Arriba se expresa la temperatura superficial (en grados kelvin) correspondiente a un cierto V-I: los objetos más fríos son también los más rojos.

CESAR BRICEÑO AVILA

13. ESPECTROS REPRESENTATIVOS de estrellas T Tauri. A la izquierda se muestra el espectro completo entre 3700A y 7500A; a la derecha, una sección ampliada alrededor de 6700 angstrom, donde se aprecia la línea de Li I (λ = = 6707 angstrom), lo que confirma la juventud de estas estrellas (edad < ~ 15-20 millones de años). La estrella T Tauri clásica manifiesta la típica línea Hα muy intensa, al igual que otras líneas de hidrógeno (Hβ, Hγ). Con nuestra técnica detectamos también T Tauri débiles, como la de los dos paneles superiores. Las líneas negras verticales señalan las bandas moleculares de óxido de titanio, que se observan en estrellas con temperaturas en superficie de 3000-3500 ºK, otra característica de las estrellas de baja masa.



Otro aspecto fundamental que podemos abordar en el examen de la distribución espacial de las nuevas estrellas jóvenes concierne a la escala temporal para la disipación de nubes moleculares. No hay gas en OB1a, en donde abundan, sin embargo, estrellas T Tauri débiles. Tal cuadro se opone a un modelo de formación estelar lenta, en el que las nubes moleculares duran decenas de millones de años. Las pruebas recabadas en Orión indican que la nube puede empezar a formar estrellas, para disiparse del todo en menos de 10 millones de años, lo que duraría la gestación estelar.

Habida cuenta de que nuestro estudio abarca un área muy extensa, podemos esbozar un modelo de la formación estelar en esta vasta región. Las poblaciones de estrellas jóvenes comprenden un amplio rango de edades, ocupan zonas bastante diferenciadas y se hallan en distintos estados de desarrollo. Estas poblaciones constituyen, pues, un genuino registro fósil del proceso de formación estelar en Orión.

La región OB1a es la zona más antigua, quizás el primer episodio de formación estelar en Orión, resultado de una nube progenitora que ya se disipó. Advino luego OB1b, donde aún permanece parte del gas y numerosas estrellas retienen todavía sus discos. Por último, apareció el brote de formación de estrellas que estamos presenciando en las regiones más jóvenes, como en la nebulosa de Orión.

Trabajo pendiente

Cuando termine el sondeo de la variabilidad en Orión, dispondremos de una muestra copiosa de estrellas jóvenes en sus primeros estadios evolutivos, en distintas condiciones del entorno de gas molecular. El análisis estadístico y comparativo de estas poblaciones, y de sus propiedades, continuará ampliando nuestro conocimiento de la infancia y adolescencia de las estrellas, gestación de sistemas planetarios y tasa de supervivencia de esos protoplanetas para formar un sistema solar como el nuestro.

Al avanzar en la solución de tales cuestiones, se va allanando el camino que nos conducirá hasta el desentrañamiento del origen de la Tierra y de la vida en su seno, así como de la posibilidad de seres vivos en otros planetas similares al nuestro.

CESAR BRICEÑO AVILA

El autor

César Briceño Avila, adscrito al Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA, www.cida.ve), realizó su tesis doctoral en el Centro de Astrofísica del Observatorio Smithsoniano y la Universidad de Harvard, institución de la que es investigador asociado. Su campo de interés se centra en la caracterización de poblaciones de estrellas jóvenes en nuestra galaxia, para conocer cómo se forman, dispersan y dan origen a sistemas planetarios.

Bibliografía complementaria

THE CIDA-QUEST LARGE SCALE SURVEY OF ORION OB1: EVIDENCE FOR RAPID DISK DISSIPATION IN A DISPERSED STELLAR POPULATION. César Briceño et al., en *Science*, vol. 291, pág. 93; 2001.

ORION SHEDS NEW LIGHT ON STAR AND PLANET FORMATION. Joel Kastner, en *Science*, vol. 291, pág. 57; 2001.

A LARGE AREA CCD CAMERA FOR THE SCHMIDT TELESCOPE AT THE VENEZUELAN NATIONAL OBSERVATORY. Charles Baltay et al., en *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 114, pág. 780; 2002.

El cristalino



La investigación del cristalino ha abierto la posibilidad de un tratamiento preventivo de las cataratas. Menos esperada era la luz que arroja sobre las enfermedades neurodegenerativas

Ralf Dahm



RENEE LYNN *Corbis (impalas y leonas)*; JANA BRENNING *(fotocomposición)*

El cristalino constituye el único tejido transparente del organismo humano. En los últimos años, los expertos han determinado que esa transparencia —imprescindible para enfocar la luz— emerge, en buena medida, de cierta capacidad exclusiva: la de activar un programa de autodestrucción de sus propias células que se detiene en el instante previo a su fin. Operando así, deja células vacías, aunque viables, que transmiten los rayos visibles.

Una mejor comprensión del mecanismo en cuya virtud las células del cristalino se tornan y permanecen transparentes debería arrojar luz sobre la prevención de las cataratas que ensombrecen el cristalino. Para remediar este trastorno cegador no hay otra vía que sustituir el cristalino por un implante artificial; aun así, en numerosas ocasiones aparecen complicaciones que exigen volver a pasar por el quirófano. Dado que las cataratas afectan sobre todo a las personas mayores, cualquier método que frenara, detuviera o incluso revirtiera las cataratas sería, por supuesto, de gran ayuda.

Además de proteger la visión, ahondar en tan preciso control de la degeneración celular abriría caminos para tratar afecciones debilitantes ocasionadas por una muerte celular excesiva o inapropiada, entre las que destacan la enfermedad de Parkinson, la de Alzheimer e infecciones crónicas (el sida).

Apenas vivas

Denso, flexible y a la vez claro, el cristalino constituye una maravilla biológica. Si se enturbia, aunque sólo sea un poco, nuestro mundo visual se convierte en una feria de imágenes retorcidas y borrosas envueltas en un resplandor. Si aparece una sola mancha de color, por pequeña que sea, ésta absorbe la luz, impidiendo ver ciertas sombras.

EL ENVEJECIMIENTO COMPORTA una mayor proclividad a las cataratas, que, con el amarilleamiento de las imágenes, arruinan nuestra visión. El mismo efecto puede producirse también con otras lesiones del cristalino.

Muchos animales poseen en su organismo zonas translúcidas —las alas de los insectos, por ejemplo—, pero los tejidos transparentes escasean en la naturaleza. La córnea humana, por ejemplo, es clara; pero, más que de un genuino tejido celular, se trata de una capa delgada y gelatinosa de proteínas y azúcares. El cristalino comprende alrededor de 1000 capas de células vivas perfectamente claras. Además de la visión, el mundo natural saca provecho de la transparencia en otros ámbitos. La aplicación más destacada se observa en ciertas criaturas que medran en el océano o en aguas dulces: usan ese rasgo para mimetizarse con el medio acuoso, permaneciendo invisibles y ocultos ante los depredadores. En su mayoría, dichos animales —pensemos en la medusa— pueden considerarse sólo muy translúcidos, pero no totalmente transparentes.

Si la transparencia constituye un fenómeno poco habitual es porque las células albergan orgánulos —el núcleo (que almacena el ADN), las mitocondrias (que generan energía), el aparato de Golgi y el retículo endoplasmático (de suma importancia en la síntesis de proteínas y lípidos)— y otras estructuras internas que muestran distintos índices de refracción; cuando un rayo de luz atraviesa un área donde este índice cambia, la luz se dispersa y crea opacidad.

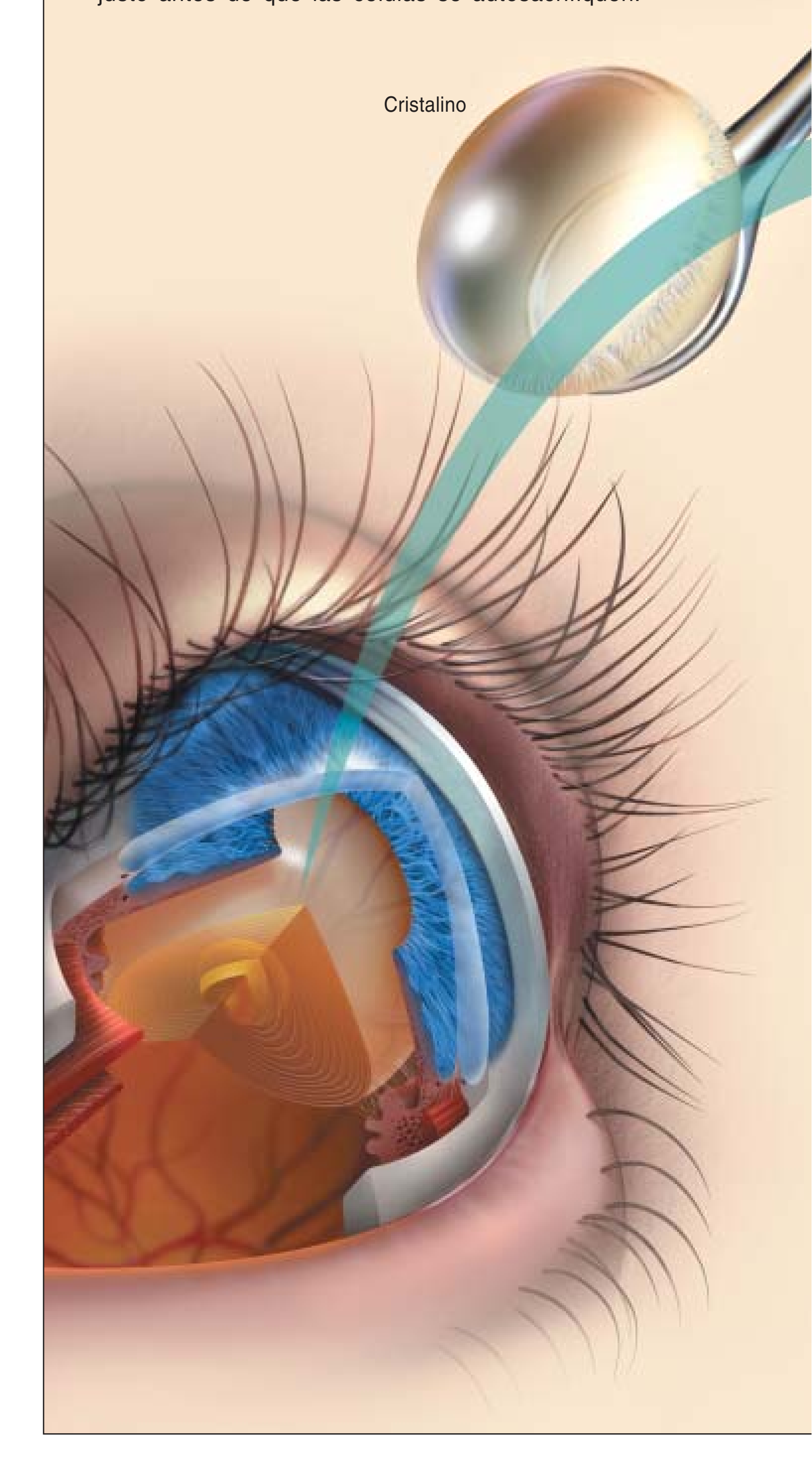
Además, algunas células absorben luz con determinada longitud de onda que les confiere color. El grupo hemo de la hemoglobina, por ejemplo, es el responsable del rojo característico de los hematíes. Organos y músculos, dado que reciben aporte sanguíneo, muestran también tonalidades rojizas. Más aún, un gran número de células, en especial las pilosas y las dérmicas, contienen melaninas: pigmentos que aparecen en colores que van del rojo al negro.

En el cristalino no encontramos melaninas ni aporte sanguíneo. Sin embargo, ello no basta para conseguir la transparencia. El cartílago, por ejemplo, carece también de melaninas, riego sanguíneo y color, pero se trata de un tejido, a lo más, translúcido. Ocurre que las células o fibras de casi todos los tejidos están orientadas en varios ángulos; ello conlleva índices de refracción diferentes y, por tanto, la dispersión de la luz que los atraviesa. El cristalino, en cambio, consta de un solo tipo de células, alineadas con precisión.

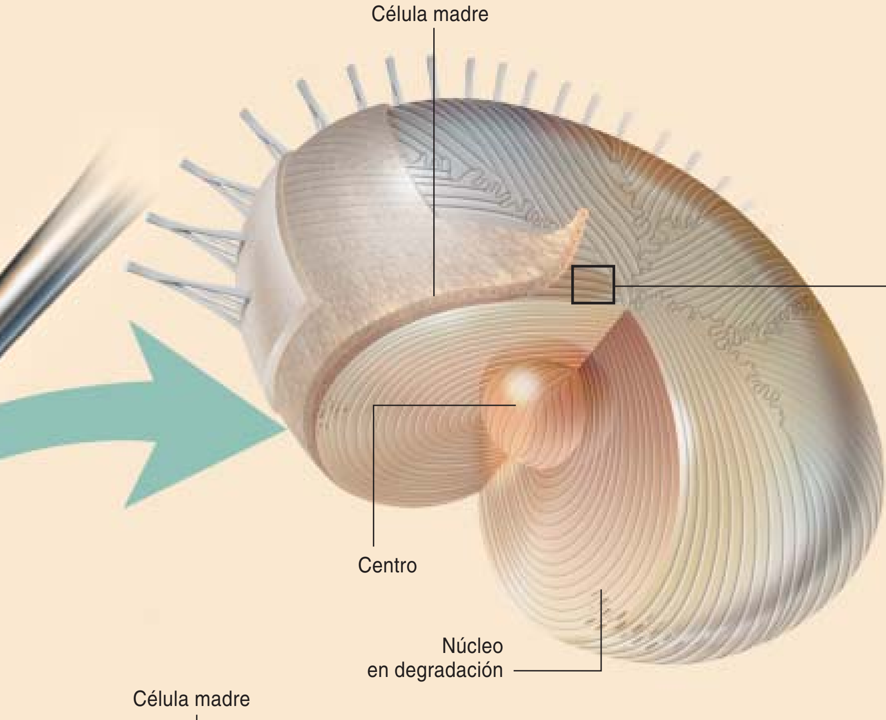
Habida cuenta de que las células del cristalino no reciben aporte sanguíneo y no poseen tejido nervioso, conjuntivo ni orgánulos, ¿pueden considerarse vivas? La respuesta depende de cómo se defina la "vida". En nuestro planeta, abundan las especies animales carentes de sangre. El cartílago humano tampoco recibe sangre y no por ello dejamos de considerarlo vivo. El aporte sanguíneo, pues, no es sinónimo de vida. Debemos buscar otra definición. Si acordamos que una célula está viva cuando cuenta con un metabolismo, entonces las células del cristalino lo están. Si bien carecen de mitocondrias para generar energía, ciertos nutrientes y otras moléculas llegan hasta las células

EL CRISTALINO: AUTODESTRUCCION EN

El cristalino debe su transparencia a su particular arquitectura y a su especial programa de desarrollo. Las células del cristalino formado se disponen en una configuración regular que limita la dispersión de la luz (*diagrama y micrografías de la derecha*). Durante el desarrollo, esas células se deshacen del material que obstruye la luz (*abajo a la derecha*) mediante la activación de un programa de autodestrucción que disuelve su interior hasta detenerse justo antes de que las células se autosacrifiquen.



BENEFICIO DE LA CLARIDAD



Capas de células del cristalino se alinean en paralelo (*arriba*), de forma que la luz pasa perpendicularmente a través de ellas, como en este cristalino bovino. En cada capa (*abajo*), las células adyacentes se entrelazan como las piezas de un rompecabezas para evitar que aparezcan fisuras cuando el cristalino cambia de forma al enfocar; la disposición en capas y el entrelazado de las células permiten que la luz atraviese los bordes celulares sin dispersarse.

Célula madre

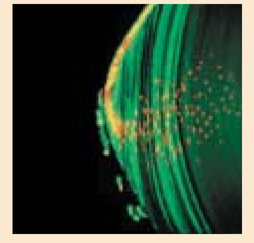
Núcleo

Célula del cristalino

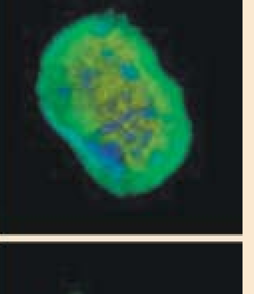
DESARROLLO DEL CRISTALINO

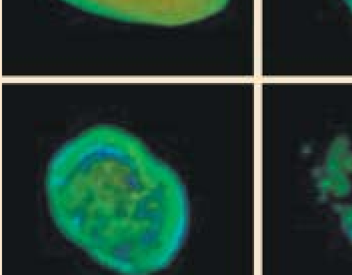
El cristalino comienza su desarrollo en el embrión temprano, cuando las células indiferenciadas (células madre) que tapizan una vesícula esférica (*izquierda, arriba*) se diferencian para dar lugar a células de cristalino que se desplazan al centro de la cavidad (*izquierda, abajo*). Formada esa zona central, se diferencian más células troncales en células que se alargan alrededor del borde externo; se añaden capas a modo de catafilos. Inicialmente, estas células cuentan con núcleo, mitocondrias, retículo endoplasmático y otros orgánulos típicos. Pero, conforme quedan encapsuladas por células más recientes, sus orgánulos se degradan, hasta que sólo queda la membrana externa y una solución espesa de proteínas cristalinas. Este material, apenas vivo, ofrece un índice de refracción uniforme, por lo que no dispersa la luz.

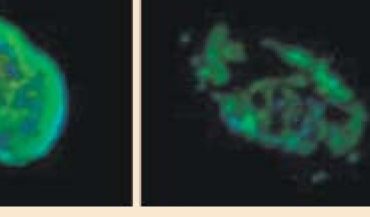
El proceso se observa en un cristalino en desarrollo (*abajo, a la izquierda*) y en un cristalino de ratón completamente desarrollado (*abajo, a la derecha*). Nuevas células se estiran alrededor de la región ecuatorial y se mueven hacia el interior a medida que otras células, más recientes, las van cubriendo. Los núcleos celulares (*rojo*), que viajan al interior, persisten durante algún tiempo, pero acaban disolviéndose conforme las células quedan enterradas.











El núcleo de una célula del cristalino en desarrollo se disuelve al cabo de unos días (*derecha*); la cubierta nuclear y el ADN se degradan a la par.

KEITH KASNOT (*dibujos*); RALF DAHM (*arriba, imagen de microscopio de barrido, capas*); ALAN R. PRESCOTT, UNIVERSIDAD DE DUNDEE, ESCOCIA (*abajo, imagen de microscopio de barrido, piezas de rompecabezas*); DE "DEVELOPMENT OF A MACROMOLECULAR DIFFUSION PATHWAY IN THE LENS," POR V. I. SHESTOPALOV Y S. BASSNETT, EN *JOURNAL OF CELL SCIENCE*, VOL. 15; 2003 (*abajo, izda, ambas imágenes, células nucleadas*); RALF DAHM (*abajo, dcha., las 4 imágenes, degradación de núcleos*)

más externas del cristalino y de allí pasan lentamente hacia el interior, de una célula a otra.

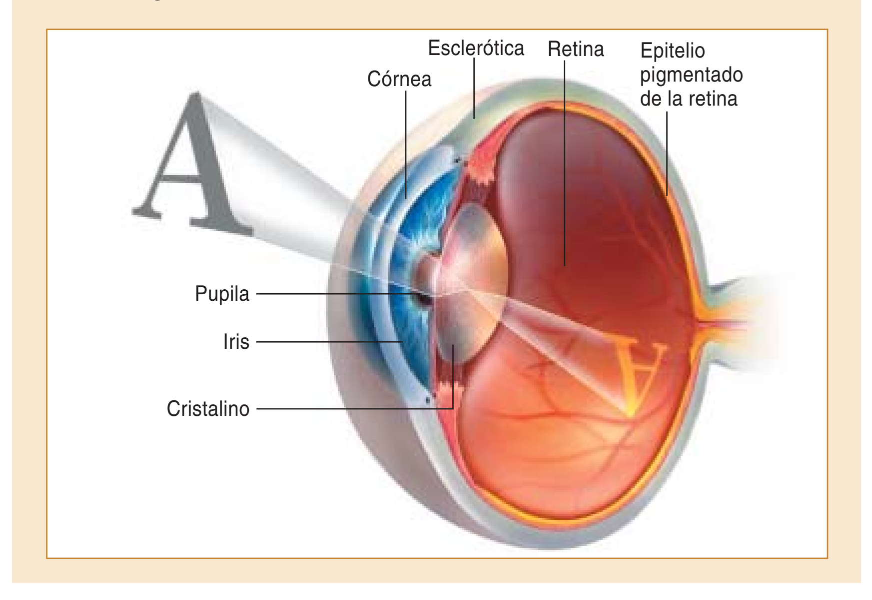
Las células jóvenes del cristalino sí tienen orgánulos cuando se forman a partir de las células troncales en el feto, pero aquéllos se destruyen en las primeras fases del desarrollo. (Lo mismo ocurre con las células nuevas que periódicamente se depositan en la edad adulta.) Sólo queda un citoplasma, que consta de una disolución espesa de proteínas cristalinas. Aunque el cristalino se describe a menudo como un cristal, no lo es en sentido químico. (En una red cristalina, la posición geométrica relativa entre iones o moléculas se repite de forma sistemática.) Se trata de un "cristal biológico", es decir, son las células las que adoptan una disposición regular. Cada célula contiene macromoléculas, las proteínas cristalinas, que forman complejos con disposiciones paracristalinas. Esta distribución hace que el citoplasma sea ópticamente homogéneo: el índice de refracción no cambia dentro de la célula ni tampoco de una célula a otra.

El color de los ojos

El mecanismo que permite al ojo enfocar la luz (*diagrama*) explica no sólo cómo vemos, sino también por qué nuestros ojos aparecen castaños, azules, o rojos en una fotografía. El iris bloquea la luz incidente dejando un agujero claro —la pupila— a través del cual los rayos luminosos llegan al cristalino y se enfocan sobre la retina. Los rayos que llegan al iris se dispersan hacia atrás. La dispersión resulta mayor cuanto menor es la longitud de onda de la luz; por eso, la luz azul se dispersa más que la roja, motivo por el cual confiere al iris un color azul. (Ese mismo principio explica que el cielo y el mar aparezcan, también, azules.) El iris contiene también melanina: un pigmento que absorbe diversas longitudes de onda. Con una notable concentración se absorberá mucha luz, de lo que resultará un iris pardo obscuro. Con menos cantidad de melanina, el color del iris vira a marrón claro y verde. Si la melanina escasea, dominan los azules.

La pupila aparece negra debido a la capa de células ricas en melanina que se halla precisamente detrás de la retina —el epitelio pigmentario retiniano— y absorbe toda la luz que ésta no retiene. Tamaña absorción evita que la luz se disperse al azar hacia los fotorreceptores de la retina, lo que ensombrecería la visión. (El recubrimiento negro de una cámara cumple idéntica función.) Como no se emite ninguna luz hacia afuera a través de la pupila, ésta aparece negra.

Los albinos no sintetizan melanina. Su epitelio pigmentario retiniano absorbe, por tanto, poca luz; ello hace que la visión sea pobre, o casi nula, en luz brillante. Conforme la luz se dispersa hacia la pupila y el iris, ilumina los vasos sanguíneos, que aparecen de color rosa o rojo. Un efecto semejante ocurre cuando se utiliza el flash para hacer una fotografía: emite tanta luz, que el epitelio no puede absorber todos los rayos; la dispersión hacia atrás hace que el ojo se vea rojo en la fotografía.



Cataratas: visión ensombrecida

La claridad, como todo en biología, tiene un precio. El suicidio controlado de los orgánulos conlleva graves complicaciones para las células del cristalino. Con el núcleo, desaparece el programa genético que dirige la síntesis de nuevos componentes. Las células maduras del cristalino no pueden regenerarse ni repararse a sí mismas, como hacen las células de otros tejidos.

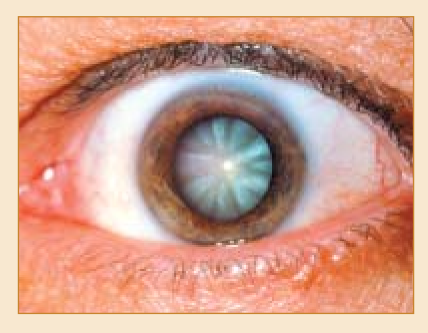
La capacidad para reemplazar zonas dañadas constituye una ventaja de suma importancia para los sistemas biológicos. Las moléculas que forman las células humanas tienen una vida media que va desde escasos minutos a varios días. Al cabo de unos seis meses, el 90 por ciento de las moléculas de nuestro organismo se reemplazan por otras nuevas. Las células del cristalino, sin embargo, deben operar durante toda la vida del individuo, un largo trecho.

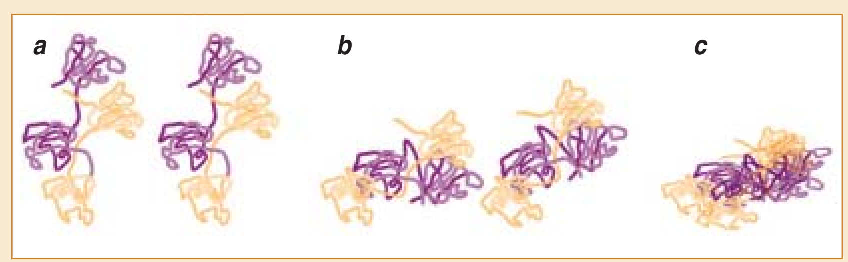
La falta de mecanismos de reparación aumenta la vulnerabilidad de estas células ante ciertos tipos de estrés. Una deshidratación severa, por ejemplo, puede provocar que las proteínas cristalinas precipiten, de forma que las células se acumulen en un conglomerado: una catarata. Esta mota altera la uniformidad del índice de refracción, originando una mancha borrosa en el campo de visión. Bastan sólo unas pocas semanas de intensa deshidratación para provocar la formación de una catarata.

Aun en ausencia de dichas condiciones estresantes, la incapacidad de autorrepararse se traduce, andando el tiempo, en la acumulación de pequeñas lesiones. La exposición habitual a radicales libres y otras moléculas reactivas, a la radiación ultravioleta o a períodos prolongados de hiperglucemia a causa de la diabetes desembocan, para muchos, en la formación de cataratas,

KEITH KASNOT

Así se forman las cataratas





Las cataratas del cristalino nublan la vista o ciegan a millones de personas cada año. Las células del cristalino contienen una solución espesa de cristalinas (*a*), en una disposición ordenada. A medida que esas proteínas de gran tamaño van sufriendo embates de la luz ultravioleta, la oxidación o la deshidratación, se altera su conformación y resultan en fibras mal plegadas (*b*). Luego, éstas se agregan en un amasijo desmadejado (*c*). Esta masa proteica bloquea o distorsiona la luz incidente, creando una mancha nubosa en el campo de visión (*fotografía*). En el cerebro de personas con enfermedad de Alzheimer o Parkinson se han encontrado concentraciones importantes de proteínas mal plegadas. Espoleados por esa observación se ha intensificado la búsqueda de señales comunes.

ALICE CHEN (*dibujos*); SCIENCE PHOTO LIBRARY (*fotografía*)

con la exigencia consiguiente de una intervención quirúrgica.

Las primeras referencias a la eliminación de cristalinos nubosos se remontan al código babilónico de Hammurabi, de 1800 a.C. En textos egipcios antiguos y en libros medievales europeos e islámicos se describen operaciones en las que el cristalino se separaba del músculo ciliar y se empujaba después hacia el humor vítreo, el líquido espeso del interior del ojo. Así eliminaban el velo que obstruía el camino de la luz, pero no dejaban ninguna lente para enfocar los rayos. Los pacientes veían solamente imágenes borrosas, como si sus ojos estuvieran abiertos dentro del agua.

El uso de gafas especiales en los siglos XVII y XVIII compensó por fin la pérdida de enfoque. El cristalino artificial de nuestros días orilla la necesidad de llevar gafas. Además, la técnica aplicada en la intervención de cataratas ofrece un porcentaje de éxito cercano al 100 por ciento. Sin embargo, alrededor de un tercio de los pacientes vuelven al médico con problemas posoperatorios, producidos por células indiferenciadas —troncales— que, de forma inadvertida, no se han extirpado. Estas no sólo empiezan a proliferar, sino que, a diferencia de lo que acontece durante el desarrollo embrionario, forman un amasijo desorganizado que oscurece la visión y demanda su pronta extirpación. En los países en vías de desarrollo donde carecen de recursos quirúrgicos, las cataratas causan la mitad de los casos de ceguera. Sólo en la India, ciegan a unos 3,8 millones de personas cada año.

Además de tornarse vulnerable a las cataratas, con la edad el cristalino tiende a amarillear. Proteínas que absorben la luz azul y verde se acumulan poco a poco, impidiendo que estos rayos lleguen a la retina y provocando que el cristalino muestre un aspecto amarillo o marrón. Puesto que sólo pasa la luz roja, amarilla y marrón, la percepción del mundo queda alterada.

Autodestrucción controlada

La investigación de los procesos que sigue el cristalino en la destrucción sistemática de sus orgánulos se ha encontrado con un nuevo filón: vías posibles de solución de algunas de las enfermedades más esquivas de la humanidad.

Las células del cristalino que derivan de células madre durante las primeras fases del desarrollo fetal contienen orgánulos. Mas, a medida que se diferencian, los destruyen y eliminan para adquirir su transparencia característica. Quizás eso, considerado a primera vista, no nos parezca problemático. Pero reparemos en lo que ocurre cuando otras células sufren una pequeña lesión en su ADN: se embarcan en un proceso irreversible de muerte celular programada o apoptosis. En el interior celular, determinadas proteínas destructoras trocean el ADN y proteínas fundamentales; las mitocondrias se paralizan y dejan de constituir la fuente energética que abastece a la célula. Esta, desorganizada, se despedaza y disuelve. De ordinario, las células lesionadas se suicidan para dar paso a nuevas células sanas, pues un órgano que fuera acumulando células taradas resultaría ineficaz. En ocasiones, las células lesionadas se autodestruyen para evitar su proliferación y el riesgo de convertirse en cancerosas. Las células del cristalino destruyen su núcleo y los demás orgánulos, pero suspenden el proceso justo antes de completar la demolición, dejando una membrana externa intacta, un citoesqueleto de proteínas y un plasma espeso de cristalinas.

El descubrimiento de esa capacidad de detener el suicidio celular constituyó una auténtica sorpresa. La apoptosis siempre se había considerado un proceso imparable. Sin embargo, por algún mecanismo que se desconoce, el cristalino controla esta maquinaria letal para que destruya sólo determinados componentes celulares y deje intactos otros. Hace unos años, el autor y otros expertos en el cristalino empezamos a sospechar que en ese proceso intervenía un mecanismo de freno deliberado. Demostramos que el núcleo y las mitocondrias de las células en proceso de diferenciación sucumbían a la misma destrucción que ocurre durante la apoptosis completa de células maduras. Otros componen-

UN PINTOR CON CATARATAS





CLAUDE MONET pintó el puente japonés del jardín de su casa de Giverny, cerca de París, en 1899 (*izquierda*). La misma escena, captada de nuevo entre 1918 y 1924, revela alteraciones en su visión: las cataratas habían nublado su vista y el amarilleamiento de su cristalino le había alterado la percepción de azules y verdes, dejándole en un mundo dominado por rojos y marrones turbios.

EL PUENTE JAPONES, DE CLAUDE MONET, DONACION DE VICTORIA NEBEKER COBERLY, EN RECUERDO DE SU HIJO JOHN W. MUDD, Y WALTER H. Y LEONORE ANNENBERG, IMAGEN © BOARD OF TRUSTEES, GALERIA NACIONAL DE ARTE, WASH. D.C. (*izquierda*); INSTITUTO DE ARTE DE MINNEAPOLIS, LEGADO POR PUTNAM DANA MCMILLAN (*derecha*)

El impresionista francés Claude Monet (1840-1926) vivió hasta los 86 años. Pero en su ancianidad las cataratas le nublaron la visión; el amarilleamiento del cristalino le alteró la percepción de los colores. La obra de los dos últimos decenios de su vida ofrece una viva imagen de cómo estas alteraciones distorsionan la visión humana.

Primero, su visión de tiñó de amarillo. De forma gradual, las proteínas que absorben los colores "fríos" (violeta, azul y luego verde) se acumularon en el cristalino, impidiendo que estos rayos luminosos llegasen a la retina. La luz roja o amarilla seguía pasando, llenando el mundo de Monet de tonos cada vez más cálidos.

Luego, las cataratas nublaron su vista; percibía el entorno como si mirara a través de un vidrio esmerilado. Andando el tiempo, discernir las formas se convirtió en una tarea harto difícil y la luz del día terminó por resultarle cegadora; en las últimas etapas de su vida sólo distinguía entre luz y sombra.

Monet se percató de las alteraciones en sus ojos durante un viaje a Venecia en 1908. El pintor, que contaba entonces con 68 años, notó cierta dificultad para seleccionar los colores. En 1912, su médico le diagnosticó cataratas en ambos ojos y le recomendó que se operase, pero al artista le dio miedo. En aquellos tiempos, cualquier intervención quirúrgica se consideraba peligrosa; la eliminación de cataratas había acabado con la carrera de más de un artista.

Desde entonces, la obra de Monet va perdiendo detalle. Predominan los amarillos, los rojos y los marrones. Cuando contemplaba sus últimos cuadros, a menudo se llenaba de rabia y le invadía el deseo de destruirlos. A comienzos de 1922 escribió que ya no era capaz de crear nada hermoso.

Avanzado ese mismo año, el ojo derecho ya sólo detectaba la luz y su dirección de procedencia; la capacidad visual del ojo izquierdo se redujo al 10 por ciento de lo normal. En enero de 1923, a los 83 años, se operó de las cataratas del ojo derecho; sin embargo, se quejaba de que las gafas que tendría que llevar a partir de entonces le hacían ver colores extraños.

En 1925 encontró por fin unas gafas adecuadas, que le llenaron de felicidad. Se encontraba, escribió, de nuevo con fuerzas para volver a la pintura. Moría un año después.

tes, entre ellos el citoesqueleto, persistían intactos. De lo que había de inferirse que las células del cristalino empleaban esa maquinaria letal no para autodestruirse, sino para armonizar el proceso de diferenciación.

Ese razonamiento nos llevó muy pronto a la siguiente hipótesis: un mecanismo capaz de controlar la apoptosis podría alterar el avance de enfermedades neurodegenerativas y de otras patologías debidas al suicidio celular desenfrenado. Para embridar esa fuerza, había que descubrir las señales —los bloqueadores— que interrumpen la destrucción total. En la misma onda, la identificación del factor que dispara la degradación de los orgánulos de las células del cristalino abriría nuevos caminos para inducir el suicidio de las células cancerosas.

Se está empezando a recoger las piezas que nos ha de permitir recomponer el rompecabezas. Steven Bassnett, de la Universidad de Washington, ha avanzado una teoría sobre el comienzo de la apoptosis. De acuerdo con la misma, a medida que se van formando en el curso del desarrollo nuevas células del cristalino alrededor de las que ya existen —a la manera de catafilos en una cebolla—, las células internas, más viejas, quedan alejadas de la superficie y reciben menos oxígeno. Si la concentración de oxígeno cae por debajo de un determinado umbral, se pondría en riesgo la integridad de las mitocondrias, que dependen del aporte de oxígeno para producir energía. Cuando detecta este problema, la célula dispara la liberación de factores proapoptóticos.

La teoría resulta plausible. Se sabe que las mitocondrias dañadas inician la apoptosis en las células hu-

manas maduras. La maquinaria de la muerte celular está siempre ahí, lista para operar: si la célula sufre una lesión grave, se desbloquea y se pone en marcha. Amén de la falta de oxígeno, Bassnett sugiere otra causa potencial de apoptosis: el ácido láctico, producto de la degradación de la glucosa en las células diferenciadas del cristalino. Las células maduras del centro del cristalino carecen de mitocondrias; obtienen energía mediante la transformación de glucosa en ácido láctico. Este ácido genera un gradiente de concentración, así como un gradiente de *p*H. Cualquiera de los dos podría iniciar la apoptosis.

Otros inductores han atraído también la atención de los expertos. Mediante estudios realizados con cultivos de células del cristalino, Michael Wride, en la actualidad en la Universidad de Cardiff, y Esmond Sanders, de la Universidad de Alberta, mostraron que el factor de necrosis tumoral parece promover la degradación de núcleos del cristalino. Dicho factor consiste en una proteína mensajera, o citoquina, que opera como un potente inductor de la apoptosis en células sanas y en ciertas células tumorales. Pero se desconoce el comportamiento de la citoquina en un cristalino en condiciones normales.

El grupo encabezado por Klaus van Leyen, del Hospital General de Massachusetts, ha descubierto ciertas moléculas que responden a los inductores de la muerte celular. La enzima 15-lipoxigenasa, por ejemplo, se incrusta en las membranas de orgánulos de células de cristalino y las perfora. Por esos agujeros penetran enzimas que destruyen proteínas (proteasas) y arruinan los orgánulos. Con todo, sigue sin aclararse qué es lo que activa la 15-lipoxigenasa en el momento preciso durante la diferenciación celular en el cristalino.

Esta y otras investigaciones recientes han aportado información acerca del mecanismo que frena la muerte celular. En el cristalino del hombre, de la rata y del ratón, mis colaboradores y yo hemos encontrado que la galectina-3, una proteína que se une a otras moléculas, se produce en las células del cristalino que aún cuentan con sus orgánulos, pero su síntesis se reduce cuando los orgánulos comienzan a degradarse. Este patrón de actividad podría controlar el proceso de apoptosis, pero nos hallamos lejos de conocer qué es lo que induce la eliminación de la galectina-3. Empezamos a trabajar con la galectina-3 porque está implicada en numerosas funciones biológicas relacionadas con la proliferación, apoptosis y diferenciación celular.

Sogo Nishimoto, de la Universidad de Osaka, no ha mucho, ha identificado una ADNasa esencial para la degradación del ADN en las células del cristalino. Los ratones de laboratorio que carecen de esta enzima degradadora del ADN nacen con cataratas; además, la degradación apoptótica de los núcleos no parece producirse durante la diferenciación de las células de su cristalino, pero sí ocurre con normalidad en las demás células. (Un niño puede nacer con cataratas si los orgánulos no se degradan, durante el desarrollo fetal, por culpa de una infección vírica materna.)

Más que suspender la apoptosis en curso, cabría la posibilidad de que las células del cristalino evitaran la muerte merced a la resistencia que algunos componentes opusieran contra las moléculas que llevan a cabo la autodestrucción. Por ejemplo, proteínas exclusivas del cristalino podrían ser “invisibles” a las enzimas destructoras que degradan el citoesqueleto de otras células. Algunos datos sugieren otra alternativa: las cristalinas podrían formar una barrera protectora alrededor de ciertas proteínas, evitando así que las enzimas alcancen sus objetivos.

Cebras nadadoras

El modelo animal con el que se trabaja en el estudio del desarrollo embrionario es el pez cebra. Sus embriones constan de un número escaso de células; bastante translúcidos, puede observarse la formación de órganos internos. En su mayoría, los órganos se desarrollan con una notable celeridad: tan sólo al cabo de unas 48 horas de la oviposición. Al tercer día, la cría eclosiona y comienza a nadar. Al tratarse de un vertebrado, el control genético de su desarrollo muestra una gran semejanza con el del hombre.

Varios grupos han emprendido búsquedas a gran escala de mutantes del pez cebra, entre ellos el de Christiane Nüsslein-Volhard, en el Instituto Max Planck. Algunos de los mutantes encontrados poseen cristalinos con orgánulos intactos, otros cuentan con células del cristalino completamente muertas y otros muestran cataratas parecidas a las humanas.

Los laboratorios intentan ahora descifrar si estos mutantes pueden aportar información sobre el desencadenante de la apoptosis y la suspensión de su curso. De ser así, se abrirían nuevas vías para combatir enfermedades promovidas por el descontrol de la autodestrucción celular. Mientras tanto, nos permitirán seguir ahondando en la naturaleza, origen y prevención de las cataratas. Sólo por ello merece ya la pena investigar.

El autor

Ralf Dahm, doctor en bioquímica por la Universidad escocesa de Dundee, trabaja en el departamento de biología del desarrollo del Instituto Max Planck en Tubinga. Dirige un proyecto paneuropeo que utiliza el pez cebra como modelo para investigar enfermedades y el desarrollo humanos.

Bibliografía complementaria

NUCLEAR DEGENERATION IN THE DEVELOPING LENS AND ITS REGULATION BY TNFALPHA. Michael A. Wride y Esmond J. Sanders en *Experimental Eye Research*, vol. 66, n.º 3, págs. 371-383; 1998.

LENS ORGANELLE DEGRADATION. Steven Bassnett en *Experimental Eye Research*, vol. 74, n.º 1, págs. 1-6; 2002.

DEVELOPMENTAL ASPECTS OF GALECTIN-3 EXPRESSION IN THE LENS. R. Dahm, S. Bramke, J. Dawczynski, R. H. Nagaraj y M. Kasper en *Histochemistry and Cell Biology*, vol. 119, n.º 3, págs. 219-226; 2003.

NUCLEAR CATARACT CAUSED BY A LACK OF DNA DEGRADATION IN THE MOUSE EYE LENS. S. Nishimoto y cols. en *Nature*, vol. 424, págs 1071-1074; 2003.

Emmy Noether

La matemática más importante del siglo XX hubo de sortear, a lo largo de su vida, los obstáculos con que fue encontrándose por su condición de mujer y sus orígenes judíos. Fue la primera mujer que crearía en Alemania una escuela científica

Renata Tobies

La física se basa en los principios de conservación de la energía, del impulso y del momento angular. A la matemática Emmy Noether (1882-1935) le debemos la formulación que los relaciona con propiedades fundamentales del espacio-tiempo. Los "teoremas de Noether" se cuentan entre los principales de la física matemática.

La vida de Noether contrasta con la modernidad de su legado científico: como mujer tuvo que imponerse una y otra vez a las resistencias de una sociedad de varones, cuyos hábitos nos parecen ahora propios de un remoto pasado, pese a haber transcurrido apenas cien años. Cualquier mujer menos genial habría, al menos en Alemania, sucumbido a tal oposición. Ninguna de las matemáticas de renombre pertenecía a esa nación.

Por culpa de las trabas sufridas, terminó tarde los estudios; luego, no encontró empleo oficial en su profesión, y trabajó sin salario. Hasta el fin del Imperio no pudo alcanzar el reconocimiento oficial, aunque no recibió una paga sustanciosa. Su labor, fecundísima, inspiró a numerosos alumnos. Expulsada de la universidad por los nazis en 1933, emigró a los Estados Unidos. Su muerte repentina, un par de años más tarde, cerraba una carrera científica incomparable.

Noether, en verdad, no sufrió nunca estrecheces económicas, ni siquiera en su juventud. Su padre, Max Noether (1844-1921), procedía de una familia judía de comerciantes de hierro al por mayor, bien instalada. A los 14 años, Max enfermó de polio. Se dedicó entonces al estudio, abandonando el negocio familiar.

Emmy, la hermana mayor

Maestro de Max Noether fue Alfred Clebsch (1839-1872), fundador de la geometría algebraica, quien obtuvo importantes resultados en teoría de invariantes y en mecánica. Con Clebsch estudiaron también Felix Klein (1849-1925) y Paul Gordan (1837-1912). A los cultivadores de la física matemática no hay que ponderarles la importancia central de los coeficientes de Clebsch-Gordan.

Pese a la dura oposición de la época contra los científicos judíos, Klein y Gordan consiguieron que Max Noether fuera nombrado en 1875 profesor extraordinario de matemáticas de la Universidad de Erlangen; el puesto no era de carácter vitalicio ni asimilable al funcionariado. En 1888 se le nombró profesor ordinario (es decir, catedrático).

Allí, en Erlangen, Max había contraído matrimonio en 1880 con Ida Kaufmann (1852-1915). Judía como él, procedía de una familia aposentada. Merced a esa holgura económica su primogénita, Amalie Emmy, nacida el 23 de marzo de 1882, pudo dedicarse por entero al estudio. Emmy siguió las huellas de su padre. Alfred (1883-1918), nacido un año después, cursó la carrera de químicas, doctorándose en Erlangen en 1910. A la matemática aplicada se dedicó Fritz (1884-1941), con quien Emmy se entendería mejor. Fritz se doctoró en la Universidad de Múnich en 1909 con Aurel Voss (1845-1931), otro discípulo de Clebsch, con la tesis "Sobre el movimiento de una esfera que se desliza sobre superficies de rotación". El menor de los hermanos, Gustav Robert (1889-1928), sufrió retraso mental.

Aunque Emmy se había doctorado antes que Frtiz, se abrió camino éste en su carrera con mayor rapidez. Por la única razón de ser hombre. Se habilitó para la enseñanza superior en 1911, en la Escuela Técnica Superior de Karlsruhe; allí recibió el nombramiento de profesor extraordinario en 1918; tres años más tarde, pasaría a desempeñar el puesto de profesor ordinario en la Escuela Técnica Superior de Breslau (la actual



1. A LOS 33 AÑOS, Emmy Noether era ya una matemática de renombre. Pese a ello, se le negó la posibilidad de optar a una carrera universitaria normal. No pudo alcanzar la plaza de catedrático (profesor ordinario, en el sistema alemán). La llamada a filas, durante la Primera Guerra Mundial, de un joven profesor, le franqueó la entrada en la docencia en Gotinga.

BIBLIOTECA ESTATAL Y UNIVERSITARIA DE BAJA SAJONIA, GOTINGA

Wroclau, Polonia). Con la toma del poder por los nazis huyó a la Unión Soviética. Acusado en falso de espionaje, murió víctima del terror estalinista en 1941.

Emmy Noether recorrió en un principio el camino predestinado a la "primogénita". De 1889 a 1897 estudió en la Escuela Superior Estatal Femenina de Erlangen. Prosiguió su formación en Stuttgart. En 1900 superó el examen de maestría en francés e inglés, con notas brillantes. Sin embargo, no se dedicó a la enseñanza, que hubiera sido la salida habitual.

El gobierno de Baviera había aprobado un decreto el 28 de marzo de 1900 en cuya virtud se permitía a las maestras asistir a clases de ciencias y de humanidades en las correspondientes secciones de las facultades de filosofía, siempre y cuando los profesores a cargo de las mismas no opusieran reparo alguno. De ese modo, Emmy Noether pudo inscribirse en la Universidad de Erlangen. El número de alumnas fue al principio muy bajo; en el semestre de invierno de 1902/03 había una decena escasa en toda la universidad, cifra que quedó en tres el semestre siguiente.

Emmy Noether aprovechó la oportunidad que se le brindaba de aprender cuanto necesitaba para someterse al examen de reválida del bachillerato (*Abitur*) en un instituto masculino. Superó la prueba, como alumna externa, el 14 de julio de 1903. Ocurría en el Instituto Imperial de Nuremberg. Sus hermanos, en cambio, no habían tenido dificultad alguna en realizar los cursos preparatorios de esa prueba de madurez en el instituto masculino de Erlangen. Alfred pasó el Abitur en 1902 y Fritz en 1903.

No había, en los institutos femeninos, clases de matemáticas ni de ciencias. Hasta 1908 no se establecieron en Prusia, la primera región alemana que lo hizo. Dos años más tarde se sumó Baviera. Superado el *Abitur*, podía Emmy matricularse sin obstáculos en la universidad de su ciudad natal. Baviera había seguido, en 1903, los pasos de Baden en aceptar la incorporación de la mujer en la universidad, estado que tomó dicha medida en 1900.

Entre las tres universidades bávaras (Múnich, Würzburg y Erlangen) contaban treinta las primeras alumnas matriculadas, una minoría en comparación con los 6851 varones inscritos. En Erlangen, la menor de las tres, sólo una mujer frente a 981 varones. Y esa no era Emmy. La mayor de los Noether prefirió estudiar en Gotinga. No pudo, sin embargo, matricularse oficialmente, pues tal posibilidad no se dio en Prusia hasta 1908. Pero en Gotinga había mayor oferta docente y, además, no era la única mujer que asistía a las clases.

Gotinga, el centro internacional de las matemáticas

Klein y David Hilbert (1862-1943) habían creado en Gotinga en 1900 un centro internacional de matemáticas extraordinario. Publicaban los "Anales de Matemáticas", una de las principales revistas de la es-



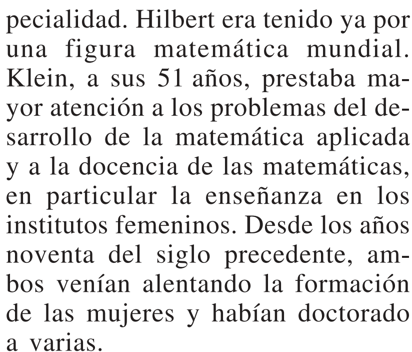




2. EL PADRE NATURAL y los padres científicos de Emmy Noether: Max Noether, Felix Klein (óleo de Max Liebermann, 1912) y David Hilbert.



BIBLIOTECA ESTATAL Y UNIVERSITARIA DE BAJA SAJONIA, GOTINGA (*Max Noether y David Hilbert*); INSTITUTO DE MATEMATICAS DE GOTINGA (*Felix Klein*)



pecialidad. Hilbert era tenido ya por una figura matemática mundial. Klein, a sus 51 años, prestaba mayor atención a los problemas del desarrollo de la matemática aplicada y a la docencia de las matemáticas, en particular la enseñanza en los institutos femeninos. Desde los años noventa del siglo precedente, ambos venían alentando la formación de las mujeres y habían doctorado a varias.

Nada tiene, pues, de extraño que la matemática de Gotinga llevara decenios de ventaja sobre la cultivada en la sociedad alemana de aquella época. Dominaba aún la idea de que las matemáticas no era disciplina para la mujer. Paul Möbius (1853-1907), neurólogo que escribió un libro de título "Sobre la imbecilidad fisiológica de la mujer", se expresaba así en "Sobre el talento para las matemáticas", otra obra suya muy difundida y publicada en 1900: "Se puede decir, pues, que una mujer matemática lo es contra natura; en cierto sentido, una suerte de hermafrodita. Las mujeres ilustradas, en las ciencias o en las artes, son el resultado de una degeneración. Sólo desviándose de sus capacidades naturales, cambiándolas en un sentido dañino, puede la mujer adquirir otros talentos distintos de los que convienen a una amante y a una madre".

Doctorado con el "rey de la teoría de los invariantes"

Tras un semestre ausente por culpa de una enfermedad, Emmy Noether volvió a las clases en otoño de 1904, ahora en Erlangen. Terminó los estudios en 1908 con la lectura de una tesis "Sobre la construcción de los sistemas de formas de una forma ternaria bicuadrática". Se trataba de un tema de la teoría de invariantes algebraicos.

Esa teoría, elaborada por numerosos matemáticos hacia finales del siglo XIX, alcanzó por entonces una época de esplendor. A Emmy le dirigió la tesis Paul Gordan, conocido por "rey de la teoría de los invariantes". Había participado en el desarrollo de un método simbólico con el que resultaba posible calcular de manera efectiva los invariantes, lo que hizo también Noether en su tesis doctoral. El trabajo se publicó en la "Revista de matemática pura y aplicada (revista de Crelle)". No intervino su padre, Max Noether, miembro del consejo de redacción de los "Anales de matemáticas".

De acuerdo con los usos académicos alemanes, para la prueba oral del examen de doctorado había elegido matemáticas como materia principal y, por secundarias, física y filología románica. Superó "summa cum laude" el examen el 13 de diciembre de 1907. Se convertía así en la segunda matemática alemana —la precedió otra en Heidelberg— que obtenía su doctorado en una universidad de la propia Alemania. Antes que Noether, en Gotinga se habían doctorado cuatro rusas, dos norteamericanas y una inglesa.

Tras el doctorado, trabajó varios años en Erlangen sin plaza propia. Por consejo de Ernst Fischer (1875-1954), se centró pronto en los resultados de Hilbert. Y terminó así por adentrarse en los dominios de la física teórica y del álgebra moderna. En efecto, en 1890 Hilbert había resuelto un problema clásico de la teoría de los invariantes con métodos abstractos. Diez años después, consideraba que constituía un campo donde podían esperarse avances importantes. En su tan famosa lista de 23 problemas no resueltos de la matemática, que presentó en el Segundo Congreso Internacional, celebrado en París en 1900, el que figuraba en decimocuarto lugar consistía en una pregunta acerca de la teoría de los invariantes. En ella concentró Emmy Noether toda su energía.

Aunque introducida en la comunidad matemática de la mano de su padre, no tardó en comprobar que despertaba interés por sus propios trabajos. La lista de las ponencias de las primeras reuniones de la Sociedad Alemana de Matemáticas da buena idea de ello. Mientras que en 1909 había presentado un resultado relativo a la teoría de invariantes, en su exposición de cuatro años más tarde "Sobre los cuerpos de funciones racionales" se reconoce ya su dominio del álgebra abstracta de estructuras aritméticas, iniciada en gran manera por Hilbert. Este trabajo se publicaría en los

"Anales de matemáticas". Tras ese primer escrito, que Hilbert avalaría en 1915 como tesis de habilitación de Noether para ejercer la docencia universitaria, la revista recogería otros muchos suyos.

Tres escalas hacia la habilitación

Mirado con perspectiva, la facultad de matemáticas de Erlangen no había resultado la elección más conveniente para hacerse un nombre en el mundo de la matemática. Se trataba de una facultad muy pequeña: entre 1907 y 1945 se leyeron así sólo 26 doctorales. Sólo una mujer recibió allí ese grado, en 1936. En el mismo intervalo temporal, Gotinga concedió el título a 160 estudiantes. Resultaba imperioso entrar en un centro de alta productividad científica.

Por deseo de Klein y Hilbert, en el semestre de verano de 1915 fue llamada a Gotinga para sustituir a un *Privatdozent* enviado al frente. Los matemáticos de Gotinga solicitaron su habilitación. Klein, profesor emérito, escribía así al ministerio de cultura de Prusia: "... que la señorita Noether cumple sobradamente las condiciones necesarias para serle otorgada la habilitación, ya que supera con creces la calidad media de los candidatos a los que la hemos otorgado durante los últimos años".

Pero ese primer intento fracasó. El reconocimiento del claustro de las cualidades de Noether no bastó para obviar un decreto prusiano del 29 de mayo de 1908 que negaba la habilitación a las mujeres. Merece la pena recordar la historia de ese documento. De entrada, se promulgó tras someterlo a consulta pública: en 1907, María von Linden (1869-1936), bióloga de Bonn, presentó una solicitud de habilitación, grado que le facultaba para dar clases en la universidad. Ante ese ruego, al ministerio se le ocurrió preguntar al claustro sobre la habilitación de las mujeres. La mayoría se opuso.

Los matemáticos de Gotinga sí dieron en 1915 su visto bueno para Noether. Sin éxito. Tampoco lograron su propósito en un segundo intento, acometido dos años después. Hasta que, también en 1917, a Hilbert se le ofreció una cátedra en Berlín. Para proseguir en Gotinga exigió, entre las condiciones negociadas con su universidad, contar con la colaboración de Noether.

Los matemáticos de Gotinga venían abordando problemas de física teórica desde comienzos del segundo decenio del siglo. En 1915 Albert Einstein (1879-1955) había publicado la versión final de su teoría de la relatividad general. Acogida en un principio con escepticismo entre la comunidad de los físicos, encontró, sin embargo, una gran resonancia entre los matemáticos. Vemos un reflejo de ese espíritu en Eduard Riecke (1845-1915), físico de Gotinga quien señalaba en 1911: "Los matemáticos quedan hipnotizados ante la elegancia de las ecuaciones, en cambio los físicos somos muy críticos". La posibilidad de un espacio curvo no asustaba a ningún matemático familiarizado con las geometrías no euclidianas. Como indicara el propio Klein, "aunque sin conciencia de ello y de forma distinta, portaban en su interior las nuevas líneas de pensamiento, merced a las investigaciones que se venían desarrollando sobre los nuevos invariantes teóricos (o geométricos)".

En 1916 Hilbert dictó varias lecciones sobre los fundamentos de la física. Por esas fechas Klein se ocupó con intensidad de los mismos problemas y, en marzo de 1917, iniciaba un intercambio epistolar con Einstein, al tiempo que preparaba lecciones y disertaciones sobre la teoría de la relatividad general. Hilbert y Klein no olvidaron, en sus publicaciones respectivas, agradecer la colaboración determinante de Emmy Noether.

De ese trabajo conjunto surgió el escrito de Noether "Problemas de Variaciones Invariantes", que Klein presentó el 26 de julio de 1918 en la reunión de la Sociedad Científica de Gotinga (hoy Academia de Ciencias de Gotinga). A propósito de este artículo, Einstein comentaba en carta de 27 de diciembre de 1918 a Klein lo siguiente: "Al recibir el nuevo trabajo de la Srta. Noether volví a sentir de modo acuciante la enorme injusticia que se comete con ella al no otorgarle la *venia legendi* (la facultad de enseñar). Propongo que escribamos de inmediato una enérgica carta al ministerio". Con ese propósito, el 5 de enero de 1919 remitía Klein al subsecretario Naumann, en Berlín, este texto: "En los tiempos actuales no podemos dejar de percibir que el puesto que ocupa hoy la Srta. Noether parece, por muchas razones, una injusta limitación. Para empezar, el trabajo de la Srta. Noether está muy por encima de todas nuestras expectativas. Durante los últimos años ha completado una serie de investigaciones que sobrepasan, en el período señalado, las que haya llevado a cabo cualquier otro miembro de la facultad, incluidos los catedráticos".

INVARIANTES ALGEBRAICOS

Un ejemplo de invariante algebraico lo constituye el polinomio $x_1x_2x_3 + x_1x_2x_4 + x_1x_3x_4 + x_2x_3x_4$, dado que es invariante (o sea, permanece inalterado) bajo cualquier intercambio de las variables x_1, x_2, x_3 y x_4. En general, un invariante algebraico es un polinomio, es decir, una suma de expresiones que tienen la forma de una constante multiplicada por un producto de potencias de las variables, invariante bajo determinadas transformaciones de las variables.

Existen relaciones entre los invariantes algebraicos, lo cual hace posible que los complicados puedan descomponerse en otros más sencillos. El "teorema de finitud" de Hilbert, formulado en 1890, es un resultado de gran alcance sobre un tipo determinado de descomposición de los invariantes.

Los invariantes algebraicos son aún en la actualidad objeto de estudio intensivo. Cuando aparece un problema, sea, digamos, en la ciencia de materiales o en el procesado de imágenes, que pueda enunciarse de manera polinómica, resulta posible expresar determinadas propiedades de simetría con ayuda de los invariantes algebraicos. El problema de partida se simplifica grandemente tras hacer uso de la descomposición de esos invariantes.



3. CUATRO CONOCIDAS MATEMATICAS en el Congreso Matemático Internacional de Zúrich, celebrado en 1932: Olga Taussky, la Sra. Köthe, Emmy Noether y Ruth Moufang.

CORTESIA DE KARL SIGMUND, VIENA

Los teoremas de Noether

El 8 de mayo de 1919 decretó por fin el Ministerio de Ciencia, Arte e Instrucción Pública que no había inconveniente en que Noether recibiera la habilitación. Por trabajo de examen le valió el escrito mencionado de 1918, donde presentaba los famosos teoremas de Noether. Se trataba en realidad de una medida excepcional. Hasta febrero de 1920 no se revocó el decreto discriminatorio contra la habilitación de la mujer.

Al poco de aparecer "Problemas de Variaciones Invariantes", los físicos comenzaron a manejar sus resultados. Por citar algunos sobresalientes, Einstein, Hilbert y Hermann Weyl (1885-1955). Aunque se trataba de un trabajo matemático, expresado en su lenguaje propio, su incidencia en física teórica ha llegado hasta el punto de convertirse en uno de sus fundamentos. Con sus teoremas, Noether demostró una conjetura de Hilbert sobre la imposibilidad de formular "teoremas de energía genuinos" dentro de la teoría de la relatividad general.

Que los teoremas de Noether hallen aplicación en numerosos dominios de la física se debe a que ponen en conexión tres grandes principios fundamentales: las simetrías, los teoremas de conservación y los principios variacionales. Cada uno de estos principios tiene su propia historia.

- El mundo físico nos muestra muchas **simetrías**. Dicho de otro modo, los principios básicos de la física son invariantes bajo determinadas transformaciones. Por ejemplo, el comportamiento físico de un sistema cerrado no cambia cuando se lo transporta a otro lugar del espacio o se le orienta de otra forma. Lo mismo ocurre con las traslaciones temporales: un proceso físico, un experimento, se vuelve a desarrollar del mismo modo cuando se repite, en las mismas condiciones, transcurrido un tiempo.
- Los **teoremas de conservación** expresan que determinadas magnitudes físicas, como la masa, el impulso, la energía o la carga eléctrica, se conservan, en el sentido de que no desparecen sin dejar rastro, sino que a lo sumo cambian de apariencia. Los teoremas de conservación constituyen una ayuda imprescindible a la hora de moverse en el mundo físico. El teorema de conservación de la energía, formulado por Julius Robert Mayer (1814-1878), comprobado experimentalmente por James P. Joule (1818- 1889) y fundamentado matemáticamente por Hermann Helmholtz (1821-1894), es un hito en la historia de la física. Otros teoremas de conservación han seguido después.
- Los **principios variacionales** fueron introducidos por Gottfried W. Leibniz (1646-1716) y Pierre L. M. de Maupertius (1698-1759). Ambos se habían dado cuenta de que un rayo de luz que va de A a B, de todos los caminos posibles, elige siempre aquel en que tarda menos, aun cuando haya de flexionarse por el camino, como ocurrirá si A está en el aire y B en el agua. En general, resulta posible construir cierta cantidad que será máxima o mínima (en cualquier caso extrema) para el camino físico recorrido (en comparación con su valor para los demás caminos posibles).

Vida espartana en una buhardilla

El principio de "mínima acción" adquirió en 1834, con el principio de Hamilton, la forma que aparece en nuestros manuales. El principio variacional reduce la información física de interés a una sola función, la "integral de acción"; prescribe que lo que suceda corresponderá siempre a mínimos de dicha acción.

Noether demostró que toda simetría continua conduce, con la mediación de un principio variacional, a un teorema de conservación, y viceversa. En particular, de la invariancia de la integral de acción bajo desplazamientos en el tiempo se sigue la conservación de la energía; de la invariancia de la integral de acción bajo traslaciones espaciales, la conservación del impulso.

Con la remoción de las leyes que impedían el acceso de la mujer a la habilitación, fueron incorporándose en los claustros, en 1923, las primeras docentes. Sucedía eso en Jena y en Stuttgart. Pero el parlamento prusiano debatía todavía en 1928 si debía o no concedérseles a las docentes la condición de funcionario. En ese marco debe entenderse que la vida académica de Noether, quien obtuvo en abril de 1922 el nombramiento de "profesora extraordinaria no funcionaria", pese a haber dado clases como responsable de la

asignatura desde 1919. Y, por lo visto, con sumo provecho de los alumnos. En el acta de nombramiento, la facultad de matemáticas y ciencias de Gotinga reconocía que Noether "ejerce sobre los estudiantes inteligentes una fuerza de atracción fuera de lo común y ha formado a muchos de ellos, algunos de los cuales han alcanzado ya la categoría de profesor".

Su labor docente no iba acompañada de un sueldo. Pero la herencia de la que venía viviendo se terminó en 1923 por culpa de la inflación vertiginosa que asoló al país. Desde el semestre de verano de ese año percibió, por un curso de álgebra que se reasignaba cada semestre, una pequeña paga. Ese salario sólo le alcanzaba para vivir con privación espartana en una buhardilla. Noether se había entregado a la matemática.

Su presencia en reuniones nacionales e internacionales da fe de su creatividad. Exponía a menudo nuevos trabajos en la Sociedad Matemática de Gotinga. De 1920 a 1925 acudió con novedosos desarrollos a las reuniones anuales de la Sociedad Matemática Alemana; en 1922 ésta le invitó a escribir un informe sobre "Invariantes diferenciales y algebraicos", hecho que revela el alto aprecio en que se la tenía. En el Congreso Matemático de Bolonia de 1928, donde acudieron por vez primera tras la guerra matemáticos alemanes, aportó su contribución a una nueva línea de trabajo, las "Magnitudes hipercomplejas". Para la siguiente convocatoria, el Congreso Matemático de Zúrich de 1932, se le ofreció una de las ponencias principales. Se sucedieron las invitaciones. En 1930 sustituyó a Carl Ludwig Siegel (1896-1981), experto en teoría de números, en Frankfurt del Main.

De sus muchos colaboradores, Emil Artin (1898-1962), profesor en Hamburgo, merece una mención especial. Los círculos formados en torno a Noether y Artin mantuvieron durante años un contacto estrecho y provechoso. Ambos fueron distinguidos en 1932 con el premio establecido en homenaje a Alfred-Ackermann-Teubner; se les concedió por haber realizado, a lo largo del decenio precedente, las principales aportaciones a los campos de la aritmética y del álgebra.

La escuela de Noether del álgebra moderna

Noether siguió un programa de investigación propio, en el que contó con la colaboración de compañeros y discípulos. Bartel L. Van der Waerden (1903-1996), uno de sus alumnos más destacados, escribió en 1930/31 una *Algebra Moderna* que recogía las lecciones de Noether y Artin. Reeditada innumerables veces, ha ejercido notoria influencia en todo el mundo. A la escuela de Noether pertenecieron también Max Deuring (1907-1984), autor de otra famosa *Algebra*, y Wofgang Krull (1899-1971), que escribió un libro sobre *Teoría de ideales*.

La que ella denominaba "matemática de los conceptos" fue creada por Richard Dedekind (1831-1916), que sintetizó las propiedades comunes de estructuras algebraicas de procedencias diversas en los conceptos de ideal, anillo y cuerpo. En palabras de Van der Waerden, "la máxima por la cual Emmy Noether siempre se guió se podría formular del modo siguiente: todas las rela-

MATEMATICAS ILUSTRES

Hipatia (* Sobre el 370, Alejandría † 415, Alejandría).
Fue la científica, matemática y filósofa más célebre de la antigüedad. Entre otros resultados escribió comentarios sobre la teoría de las secciones cónicas de Apolonio, sobre la aritmética de Diofanto y también sobre la obra astronómica capital de Ptolomeo.

Gabrielle-Émilie le Tonnelier de Breteuil, Marquesa de Châtelet
(* 17.12.1706, París † 10.9.1749, Lunéville).
Ha entrado en la historia como amante de Voltaire. Tradujo con comentarios matemáticos los *Principios matemáticos de la filosofía natural*, de Newton.

Maria Gaetana Agnesi (* 16.5.1718, Milán † 9.1.1799, Milán).
Impulsó el cálculo diferencial e integral y aportó contribuciones originales a la investigación de las curvas. El Papa Benedicto XIV la nombró profesora en Bolonia en 1750, aunque no ocupó la cátedra que habían destinado para ella.

Sophie Germain (* 1.4.1776, París † 27.6.1831, París).
Destacada especialista de la teoría de números. Fue autodidacta y mantuvo bajo pseudónimo correspondencia con Carl Fredrich Gauss, que reconoció su gran valía y la apadrinó para que consiguiese un diploma honorario en Gotinga (INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1992).

Mary Sommerville, nacida Fairfax, viuda de Greig
(* 26.12.1780, Jedburgh, Escocia † 19.11.1872, Nápoles).
Escribió cuatro libros sobre mecánica celeste, física y geología que le valieron reconocimiento internacional. El más importante fue una traducción de la *Mecánica celeste* de Laplace (1831).

Ada Auguste, Condesa de Lovelace, nacida Byron
(* 10.12.1815, Londres † 27.11.1852, Londres).
Escribió los primeros programas para la "Máquina analítica" diseñada por Charles Babbage (1792-1871), con la que entre otras cosas se podían resolver sistemas de ecuaciones lineales (INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1993).

Sofia Kowalewskaya, nacida Korwin-Krukowskaya
(* 15.1.1850, Moscú † 10.2.1891, Estocolmo).
Discípula del matemático berlinés Karl Weierstrass, presentó su doctorado en 1874 *in absentia* en la Universidad de Gotinga. Hizo contribuciones muy importantes a la mecánica clásica, sobre todo en la teoría de los giróscopos.

ciones entre números, funciones y operadores resultarán transparentes, aptas para su generalización y realmente fructíferas cuando se las libere de cualquier representación particular en un objeto y se las remita a conexiones conceptuales de índole general."

Esta manera de proceder dio frutos no sólo en álgebra, sino también en muchos otros dominios. Helmut Hasse (1898-1979) calificaba a Noether como su maestra en la "penetración conceptual y la conformación invariante de los contenidos algebraicos". En 1929 escribía, sobre la extraordinaria influencia del álgebra moderna, lo siguiente: "Como ya se ha significado, los métodos algebraicos modernos no se limitan a los dominios del álgebra clásica, sino que la desbordan para extenderse por toda la matemática. Se puede hacer uso de sus principios por doquiera, encontrar las expresiones fundamentales más simples para una teoría que tengamos ante nosotros, y a partir de ahí seguir desarrollándola de manera sistematizada y unificada..."

Escuela

Con anterioridad a 1919 encontramos ya defendiendo la tesis doctoral a varios alumnos de Noether; dos de ellos en Erlangen. Desde 1925 formó parte, en Gotinga, del tribunal de tesis de doctorado y pudo examinar a sus propios estudiantes en el acceso a dicho grado, una facultad que estaba reservada a los catedráticos (profesores ordinarios). Discípulos y amigos alababan no sólo su solidez matemática y extrema exigencia, sino también su bondad y su trato exquisito. El círculo de sus discípulos llegaba hasta Francia, Japón, la Unión Soviética y los Estados Unidos.

Por nuestra parte, hemos descubierto tres nuevos doctores alemanes que no figuraban en las listas conocidas. Los que se graduaron con Noether fueron 18 alumnos, entre ellos dos mujeres, siempre con unos resultados fuera de lo común: 15 obtuvieron "summa cum laude" o "magna cum laude". Más de la mitad de sus alumnos directos siguieron luego una carrera científica, lo que dio lugar a una generación de nietos de Noether.

De la que se mostraba muy orgullosa. En carta del 5 de marzo de 1933 escrita al topólogo Pavel Sergeievich Alexandroff (1896-1982),

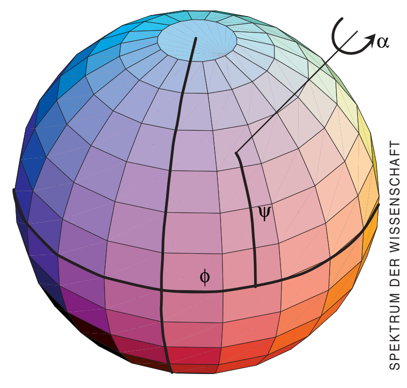
GRUPOS DE SIMETRIA Y TEOREMAS DE CONSERVACION

Una esfera es simétrica con respecto a cualquier rotación en torno a su centro, ya que queda exactamente como estaba ("invariante"). Todas las rotaciones en torno a su centro reciben por tanto el nombre de transformaciones de simetría de la esfera. Hay infinitas de ellas, cada una de las cuales viene descrita por tres números reales, los "parámetros", uno para dar el ángulo de giro y dos para determinar el eje de giro (*véase la figura*).

Todas estas rotaciones constituyen un grupo, dado que cada una de ellas es invertible. Aplicadas dos rotaciones una detrás de otra, el resultado final es una nueva rotación, y no otra cosa. El grupo es continuo, ya que podemos hacer cambios tan pequeños como queramos en los parámetros para obtener una rotación tan próxima como queramos a la que teníamos.

También el grupo de los desplazamientos en el espacio y en el tiempo es continuo, siendo sus parámetros las componentes del vector de traslación.

Como tenemos traslaciones y rotaciones tan pequeñas como queramos —en general, transformaciones tan próximas a la identidad cuanto se desee—, resultará posible efectuar en un grupo continuo el cálculo diferencial: se considera el cambio de una magnitud física bajo una transformación del grupo y luego se hace converger dicha transformación hacia la identidad. A partir del resultado de ese proceso y con ayuda del análisis matemático —más exactamente, del cálculo de variaciones—, se pueden extraer determinadas consecuencias. Esta es la idea fundamental que subyace en la demostración de los teoremas de Noether.



Una rotación en el espacio se caracteriza por medio del ángulo de rotación α y por la longitud ϕ y latitud ψ geográficas del eje de rotación.

Existen grupos continuos que no pueden parametrizarse con un número finito de números, sino en los que los propios parámetros son funciones. Un grupo de dimensión infinita de este tipo lo constituyen las transformaciones de aforo (*gauge*) de la física cuántica. En este caso resulta válido otro teorema de Noether, que se formula y demuestra de una manera ligeramente distinta. De él se sigue, por ejemplo, la conservación de la carga eléctrica, resultado de la invariancia bajo transformaciones de aforo de la acción integral de la electrodinámica.

La diferencia entre grupos de transformaciones de dimensión finita e infinita tiene sus consecuencias para la física. En la teoría de la relatividad general se tiene también un teorema de conservación de la energía, pero no es ya una energía localizada. En las teorías clásicas está bien definida la cantidad de energía contenida en un dominio del espacio; variará sólo si entra o sale energía a través de la frontera del dominio. De ahí se sigue de manera inmediata el teorema de conservación de la energía. Pero esto no puede trasladarse a la teoría de la relatividad general. El campo gravitatorio contiene energía, pero no puede saberse dónde exactamente. Se debe a la dimensión infinita del correspondiente grupo de transformaciones, según ya había sospechado Hilbert y fue demostrado de manera rigurosa por Emmy Noether en su trabajo "Problemas de variaciones invariantes".

uno de sus colaboradores más estrechos, le decía: "Me alegra mucho saber que estáis trabajando tan bien en vuestro instituto; pronto podrás contar con una joven generación de topólogos; mientras que Pontriagin y los demás que conozco sólo representan ya el papel de padres, tu disfrutarás, aún joven, de tus nietos científicos. ('Oigo que dicen que se siente Vd. ya como una abuela', me dijo Fischer de Colonia en cierta ocasión, refiriéndose a F. K. Schmidt de Erlangen)."

La "Ley de Restauración del Funcionariado" de 7 de abril de 1933 supuso para Noether la expulsión de la universidad. Se reunieron una docena de alumnos para elaborar una protesta conjunta. En ella alegaban en su defensa: "El campo en el que trabaja, las cuestiones vitales que plantea, nos han llenado a todos sus alumnos de entusiasmo y pasión por las matemáticas".



4. EMMY NOETHER (quinta desde la derecha) en 1932, en un paseo hasta la taberna Vollbrecht con estudiantes y colegas. El hombre con sombrero es Hermann Weyl.

Lecciones en Princeton

Emigró a los Estados Unidos. La Fundación Rockefeller le abonó la plaza docente que le ofreció la Universidad Bryn Mawr. Dejaba atrás, en Gotinga, la edición terminada de la obra completa de Dedekind y encauzada para su publicación la correspondencia de Dedekind con Georg Cantor (1845-1918).

En los Estados Unidos inició una nueva línea investigadora. "He estado aquí pensando cosas nuevas acerca de los cuerpos de números de Galois; aunque no es todo lo que me ocupa", escribió el 19 de marzo de 1934 a Alexandroff. Mantenía estrecho contacto epistolar con sus estudiantes y colegas de Alemania y otros países, proseguía con sus contribuciones a los "Anales de Matemáticas", aceptaba invitaciones a dar conferencias y soñaba con una plaza permanente en Princeton.

Con el Instituto de Estudios Avanzados de la Universidad de Princeton —que había acogido a Albert Einstein y a Hermann Weyl— había firmado un contrato por el que se comprometía a impartir dos horas semanales de clase. Acudía los martes y explicaba lo que el lunes anterior había enseñado a sus alumnas de Bryn Mawr. En la última carta suya que se conserva, del 3 de marzo de 1934, le exponía a Alexandroff: "No me quiero decidir todavía por la cátedra de álgebra en Moscú, pese a que me están presionando para ello. Cuando menos hasta el otoño de 1935 tengo trabajo aquí; y para más tarde, me han dicho de nuevo en Princeton que podré quedarme. De qué manera, aún no lo saben, si yendo de acá para allá como ahora o en Princeton con plena dedicación. Quedarse aquí tiene sin duda la gran ventaja de que —pese a la devaluación del dólar— se puede viajar a los cuatro puntos cardinales; en este sentido, ¡en América han crecido mis pretensiones!".

Para promocionar su círculo de discípulas, se creó en 1934 la "Beca Emmy Noether", cuya primera y única receptora fue Grace Shover, quien andando el tiempo enseñó matemática y estadística en la Universidad de Washington. Al círculo de Noether en Bryn Mawr pertenecieron también Olga Taussky, Maria Weiss y Ruth Stauffer. El nuevo y prometedor comienzo de Emmy Noether en los Estados Unidos se truncó, sin embargo, de golpe el 14 de abril de 1935. Murió de manera repentina a consecuencia de una intervención gastrointestinal. Desaparecía, en palabras de Pavel S. Alexandroff, "una gran matemática, una científica preeminente, una maestra maravillosa y un ser humano inolvidable".

La autora

Renata Tobies, especialista en historia de la matemática de los siglos XIX y XX, ha dado clases en Leipzig, Kaiserlautern, Gotinga, Oldenburg, Linz y Brunschwig.

Bibliografía complementaria

EMMY NOETHER. Auguste Dirk. Birkhäuser; Basilea, 1970.

EMMY NOETHER. A TRIBUTE TO HER LIFE AND WORK. James W. Brewer y Martha K. Smith. Marcel Dekker; Nueva York. 1981.

GESAMMELTE ABHANDLUNGEN. COLLECTED PAPERS. EMMY NOETHER. Dirigido por Nathan Jacobson. Springer; Berlín, 1983.

TRAUMJOB MATHEMATIK! BERUFSWEGE VON FRAUEN UND MÄNNERN IN DER MATHEMATIK. Andrea Abele, Helmut Neuzert y Renate Tobies. Birkhäuser; Basilea, 2004.

Juan M.R. Parrondo

Calculistas prodigiosos

¿Es posible calcular la raíz 13 de un número de 100 cifras en 0,15 segundos? Un calculista colombiano, Jaime García Serrano, asegura ostentar este récord en el libro Guiness. Desgraciadamente, es algo que no he podido comprobar. Tampoco he podido averiguar cómo se realizó la prueba. La raíz trece de un número de 100 cifras tiene entre 7 y 8 cifras y supongo que se tarda más de 0,15 segundos en escribirla o decirla de viva voz. Quizá los 0,15 segundos se refieren a lo que tardó García Serrano en *empezar* a dar la solución.

En cualquier caso, algo que me resultó curioso al documentarme sobre calculistas prodigiosos es que muchos de ellos se especializan en calcular raíces quintas y decimoterceras. ¿Por qué esta predilección? La respuesta es que las potencias quinta, novena y decimotercera de un número entero conservan el último dígito del número. Con ello se consigue una pequeña ventaja en el cálculo de la raíz. En esta tabla se muestra el último dígito de las distintas potencias:

ULTIMO DIGITO DE:				
n	n^2	n^3	n^4	n^5
1	1	1	1	1
2	4	8	6	2
3	9	7	1	3
4	6	4	6	4
5	5	5	5	5
6	6	6	6	6
7	9	3	1	7
8	4	2	6	8
9	1	9	1	9
0	0	0	0	0

Es una tabla fácil de construir si se tiene en cuenta que el último dígito del producto $n \times m$ depende sólo de los últimos dígitos de los dos factores. Así, para hallar el último dígito del cubo de un número que acaba en 7, basta multiplicar 7 por 9 (el último dígito de $7^2 = 49$), que es 63 y quedarse con el último dígito, es decir, 3. En la tabla vemos que el último dígito de n^5 coincide con el último dígito de n. La tabla se continuaría hacia la derecha de forma periódica, de modo que las potencias 9, 13, 17, 21, etc. de n tienen también su último dígito igual al último dígito de n. Utilizando este simple hecho matemático, el cálculo de la raíz quinta, novena o decimotercera de un número se puede simplificar bastante (siempre suponiendo que el resultado es un número entero). Con un poco de entrenamiento podemos convertirnos en calculistas prodigiosos y calcular la raíz quinta de un número de 10 cifras. Veamos cómo.

La raíz quinta de un número de diez cifras tendrá a lo sumo 2 cifras, ya que $\sqrt[5]{10^{10}} = 100$. La última de esas cifras es precisamente la última cifra del número original. Por lo tanto, sólo tenemos que calcular la primera cifra, la de las decenas. Para ello basta recordar la potencia quinta de todas las decenas, del 10 al 90, y ni siquiera es necesario recordarla con exactitud. Podemos calcular la raíz de cualquier número si memorizamos los números que aparecen en la siguiente tabla:

n	$n^5/100000$	Número a recordar
10	1	1
20	32	30
30	243	200
40	1024	1000
50	3125	3000
60	7776	8000
70	16.807	16.000
80	32.768	32.000
90	59.049	60.000

Una vez memorizada la tabla, pida a algún amigo que elija un número entre 0 y 100, que lo eleve a la quinta potencia en una calculadora y le diga el resultado. En unos pocos segundos usted podrá adivinar el número de su amigo. Supongamos que el número elegido es el 61. Su quinta potencia es 844.596.301. Sabemos entonces que el número elegido termina en 1. Para calcular sus decenas, eliminamos las cinco últimas cifras de la quinta potencia quedándonos con 8445. Este número está entre 8000 y 16.000, es decir, entre las entradas correspondientes a 60 y 70. Por lo tanto, la primera cifra del número elegido tiene que ser 6. Con un poco de práctica se puede dar la respuesta en algo menos de un segundo.

¿Habría otra forma de averiguar la cifra de las decenas u otras cifras de raíces quintas? La prueba del nueve, que aprendimos en el colegio para comprobar productos y divisiones, puede ayudarnos. Hagamos ahora una tabla con las cifras que resultan de aplicar

la prueba del nueve a las distintas potencias de un número:

PRUEBA DEL NUEVE						
n	n^2	n^3	n^4	n^5	n^6	n^7
1	1	1	1	1	1	1
2	4	8	7	5	1	2
3	9	9	9	9	9	9
4	7	1	4	7	1	4
5	7	8	4	2	1	5
6	9	9	9	9	9	9
7	4	1	7	4	1	7
8	1	8	1	8	1	8
9	9	9	9	9	9	9

Para obtenerla, al igual que ocurría con la tabla del último dígito, no es necesario hacer grandes operaciones. Por ejemplo, la fila correspondiente al 5 se calcula de la siguiente forma: $5^2 = 25$ da $5 + 2 = 7$; $7 \times 5 = 35$ da $3 + 5 = 8$; $8 \times 5 = 40$ da $4 + 0 = 4$; y así sucesivamente. En este caso, salvo el 3 y el 6, cuyas potencias siempre dan 9, es en la potencia séptima cuando vuelve a aparecer el número original. Esto ocurre también con la potencia 13. Quizá por ello esta potencia sea tan utilizada por los calculistas. La potencia 13 es la más pequeña en la que el último dígito y la prueba del nueve se recuerdan con facilidad.

Con la potencia quinta, tampoco es difícil recordar el resultado de la prueba del nueve. Aparecen todos los dígitos, salvo el 3 y el 6. Lo único que hay que recordar es que el 5 y el 2 están permutados, así como el 7 y el 4. Con este nuevo truco podemos calcular de nuevo la raíz quinta de 844.596.301. Si aplicamos la regla del nueve obtenemos 4. Para ello no hace falta sumar todas las cifras, porque podemos agruparlas en pares que sumen nueve y eliminar dichos pares. Del número original, 844.596.301, podemos eliminar de un vistazo las cifras 45.963 y, con un poco más de atención, el par 8-1. Nos queda entonces 4. Según la tabla anterior, las cifras del número que buscamos deben sumar entonces 7. Como la última es un 1, la primera debe ser 6.

El método tiene por supuesto el riesgo de que la suma de las cifras de la potencia quinta sea 9, en cuyo caso la suma de las cifras del número elegido puede ser tanto 3, como 6 o 9. Sin embargo, al estar estos tres números bastante separados entre sí, podemos acudir a la tabla de las potencias quintas de las decenas, recordando ahora sólo de forma aproximada las entradas del 30, 60 y 90.

Pero puede ser mucho más espectacular combinar los dos métodos: el de la tabla de las potencias de las decenas y el de la prueba del nueve. Con ambos, se puede lograr sin mucho esfuerzo, aunque con algo de práctica, el cálculo de raíces quintas de números de 15 cifras. El número elegido tendría en este caso tres cifras. Las unidades se obtienen de forma trivial, pues coinciden con las de la potencia quinta. Las centenas se pueden calcular con una tabla parecida a la de las potencias quintas de las decenas. La tabla es idéntica a la de las decenas, con la salvedad de que en la primera columna aparecerían centenas y la segunda columna correspondería a $n/10^{10}$. Aplicaríamos el método descrito anteriormente, pero eliminando las diez últimas cifras de la potencia en lugar de las cinco últimas. Finalmente, obtendríamos las decenas con la prueba del nueve.

Por ejemplo: ¿cuál es la raíz quinta de 24.953. 960.486.368? Eliminamos las últimas diez cifras y obtenemos 2495. Está entre 1000 y 3000, luego la cifra de las centenas de la raíz debe ser un 4. Por otro lado, la cifra de las unidades es 8. Finalmente, aplicando la prueba del nueve obtenemos un 1. Por tanto, la suma de las cifras de la raíz debe ser 1, con lo cual la cifra de las decenas tiene que ser necesariamente 7. El resultado es entonces 478.

Si la prueba del nueve da precisamente 9, se puede aún decidir entre las tres posibilidades. Veamos, por ejemplo, la raíz quinta de 48.524.739.602.976. La cifra de las unidades es 6. Para las centenas eliminamos los diez últimos dígitos, quedándonos con 4852, que está entre 3000 y 8000. La cifra de las centenas es entonces un 5. La prueba del nueve da 9, con lo cual la raíz buscada puede ser 516 (da 3 en la prueba del nueve), 546 (da 6) o 576 (da 9). Como 4852 está lejos tanto de 3000 como de 8000, la mejor estimación es 546, el resultado correcto. Sé que no es un método muy preciso, pero con un poco de práctica funciona en la mayoría de los casos.

Todos estos métodos muestran que, en las potencias de números enteros, hay una considerable redundancia, utilizada de manera muy hábil por los calculistas prodigiosos. Sin embargo, no hemos de restar méritos a estos magos de los números. E incluso, más allá de los trucos que utilicen, creo que son casos interesantes para indagar sobre una cuestión de bastante más calado: ¿hay una aptitud matemática intrínseca al ser humano, o son las matemáticas una pura construcción cultural? En lo que se refiere a esta cuestión, el caso más intrigante es probablemente el de Ramanujan, cuyas increíbles habilidades no se limitaban al cálculo algebraico sino que abarcaban el razonamiento abstracto en muchas ramas de la matemática.

Otro caso llamativo de calculista prodigioso, que ha aportado algo de luz al estudio de la historia de las matemáticas, es el de Thomas Fuller, un africano nacido en 1710 en la actual Liberia y que fue llevado como esclavo a los EE.UU. en 1724. Murió en Virginia a la edad de 80 años y alcanzó bastante fama como calculista. A pesar de no saber leer ni escribir, era capaz de realizar complicados cálculos con rapidez. En los últimos años, los estudiosos de este caso han llegado a la conclusión de que Fuller adquirió muchas de sus habilidades en su infancia en Africa, revelándose así que la matemática de los pueblos africanos del siglo XVIII tenía un desarrollo mayor del que se consideraba hasta ahora.

Marc Boada

El péndulo de Foucault

De entre la gran variedad de experimentos científicos, destacan los que demuestran algún fenómeno natural. El péndulo de Foucault, llamado así en honor del célebre físico francés que vivió en el siglo XIX, constituye uno de estos *experimentum crucis*: permite verificar, sin necesidad de observar el cielo estrellado, que nuestro planeta gira sobre sí mismo.

Se basa en una pesada esfera que oscila en el extremo de un fino cable. Pese a guardar estrecha semejanza con el péndulo matemático, esconde bajo su aparente simplicidad un funcionamiento delicado y sensible, que requiere una experimentación paciente y minuciosa. Con todo, acepta errores sistemáticos inferiores al 15 por ciento.

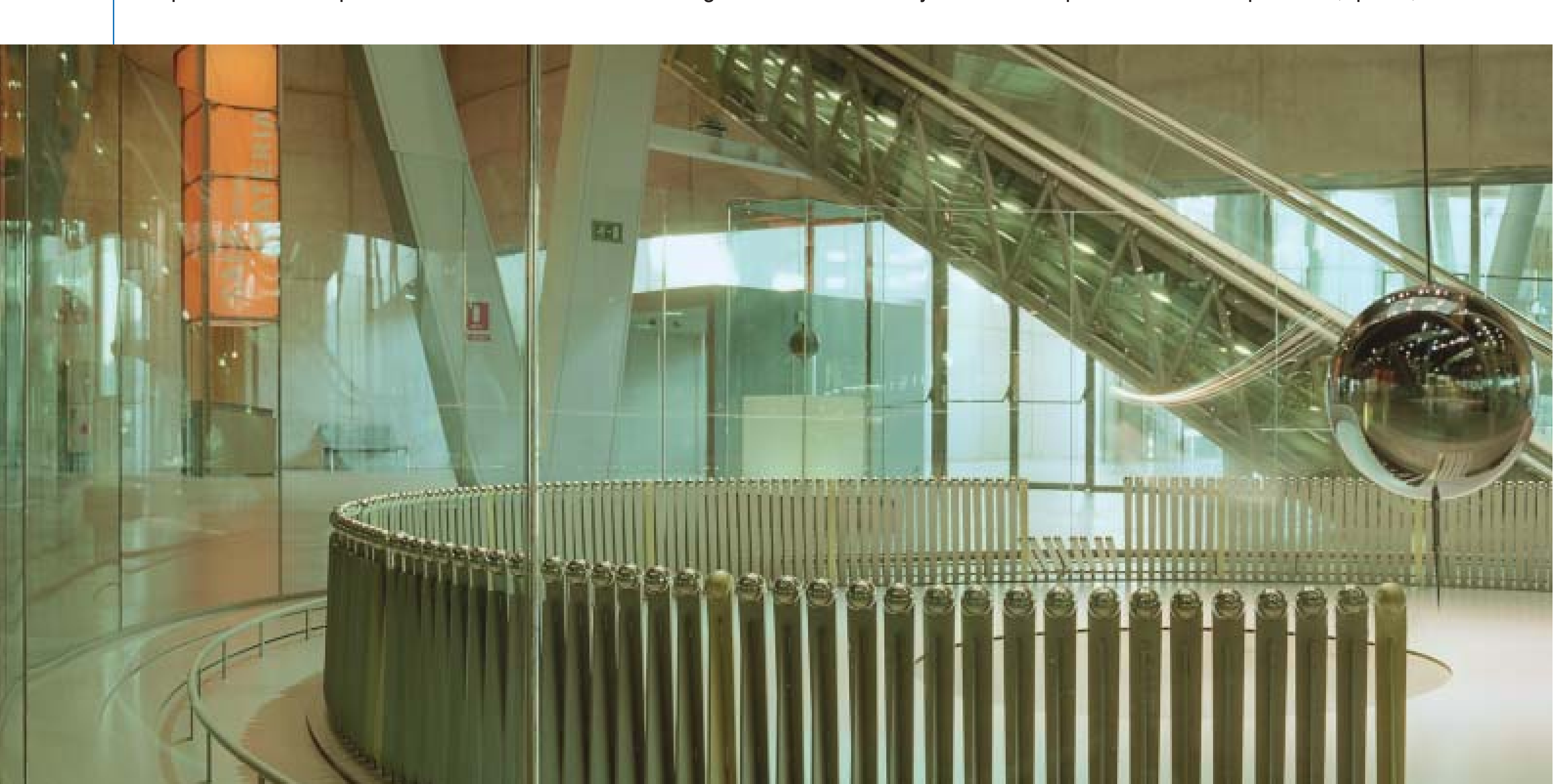
La clave del éxito del péndulo de Foucault reside en la orientación de su plano de oscilación, que tiende a mantenerse constante en el espacio. Constituye, pues, un sistema de referencia inercial respecto del cual observamos el giro de nuestro planeta. Su movimiento aparente se atribuye, a menudo, a una precesión; en realidad se trata de la rotación de la línea de los ápsides (el eje mayor de una órbita), debida a la fuerza (ficticia) de Coriolis. A ello se debe que el plano de oscilación del péndulo gire en sentido horario en el hemisferio norte y antihorario en el hemisferio sur.

Dispuestos a acometer la construcción del péndulo, localizaremos en primer lugar un espacio tan alto como sea posible; por ejemplo, una caja de escalera o una nave industrial. El propio Foucault consiguió resultados óptimos con un péndulo de sólo 2 metros de longitud.

El período de la oscilación depende sólo de la longitud del péndulo y del potencial gravitatorio en el punto donde se instala. Se aconseja restringir la amplitud de la oscilación a valores pequeños. Las grandes amplitudes conllevan algunos inconvenientes: por un lado, las ecuaciones que definen el movimiento del péndulo son más complejas (no admiten simplificaciones); por otro, en los extremos de la trayectoria el cable de suspensión se destensa, mientras la esfera intenta trazar un cicloide.

El siguiente paso consiste en fijar en el techo una placa circular metálica. Allí instalaremos un rodamiento axial de bolas y, sobre éste, la pinza que fija el cable. Como es lógico, en el punto de suspensión entre el rodamiento y el cable debe absorberse el movimiento relativo entre la Tierra y el péndulo. En nuestro caso, este movimiento se realiza mediante la torsión del hilo de suspensión. (La solución óptima pasaría por utilizar una suspensión cardán: dos círculos concéntricos cuyos ejes forman ángulo recto; ello permite mantener la orientación de un eje de rotación en el espacio, aunque su soporte se mueva.)

Los ejes de esta suspensión deben encontrarse exactamente en el mismo plano; de lo contrario, la longitud efectiva del péndulo varía según los distintos planos de oscilación y, por tanto, el período se altera. Estas pequeñas diferencias en la longitud del péndulo, junto con posibles defectos de construcción de la esfera, corrientes de aire y errores en la puesta en marcha del experimento contribuyen a tornar elíptica la trayectoria del péndulo. En la práctica, pues,



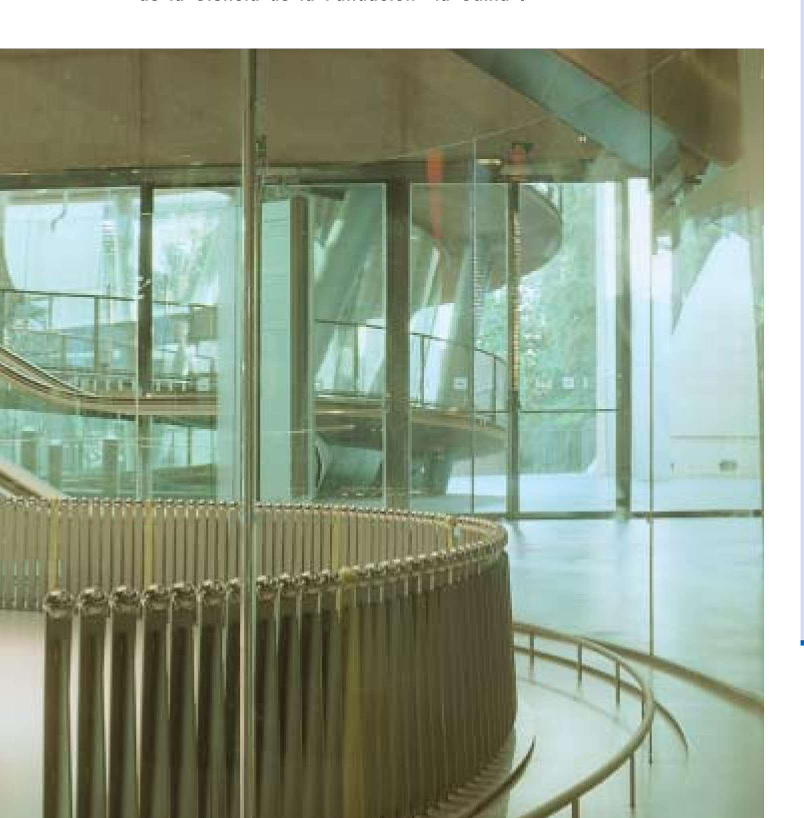
resulta casi imposible conseguir que el péndulo oscile en un plano ideal. En cada oscilación, se produce una precesión esférica que perturba el movimiento del péndulo. Por ello, se procurará una construcción simétrica.

En lo que atañe a la esfera, cuanto más pesada sea ésta mayor inercia y estabilidad conseguiremos. Entre 20 y 30 kg serán suficientes. Puede generarse con relativa facilidad mediante un torno de control numérico; durante el mecanizado deberá marcarse, con una incisión, el ecuador, perfectamente equidistante de los polos, donde situaremos el hilo de lanzamiento. La fijación del cable de acero en la esfera se consigue mediante un tornillo de presión, que comprime un cono de aluminio sobre el hilo de suspensión.

Para el cable utilizaremos, como ya hizo Léon Foucault, cuerda de piano: fino hilo de acero con una resistencia de alrededor de 150 kg/mm^2. Para esferas de 20 o 30 kilos, necesitaremos un diámetro de 0,8 mm. Cuanto más delgado sea el hilo, menor resistencia ofrecerá a la torsión y, por tanto, mejor comportamiento mostrará el péndulo a la hora de mantener constante su plano de oscilación. En cualquier caso, la fatiga del material en el punto de suspensión puede provocar la rotura; por tanto, deberemos aplicar un amplio margen de seguridad.

Con el péndulo en marcha, el experimentador verifica que, en apariencia, sólo rota una fracción de vuelta cada día. ¿Por qué no completa los 360º? En realidad, esto sólo sucedería en los polos, donde veríamos que la Tierra gira, en un día sidéreo (23h 56' 04''), una vuelta completa respecto del plano de oscilación del péndulo. Justo lo contrario sucedería en el ecuador, donde la vertical del péndulo quedaría perpendicular al eje de rotación del planeta y, por tanto, no resultaría posible detectar dicha rotación. En las

Péndulo de Foucault en CosmoCaixa Barcelona, el nuevo Museo de la Ciencia de la Fundación "la Caixa".



Una oscilación compleja y delicada

LONGITUD MAXIMA Y AMPLITUD MINIMA. Las ecuaciones que describen el movimiento del péndulo pueden simplificarse si su longitud (L) es grande y la amplitud de la oscilación (A) pequeña. En tales condiciones, el período puede aproximarse a

$$p = 2\pi(L/g)^{1/2}$$

donde la aceleración de la gravedad g (en m/s^2), a una latitud geográfica γ y una altura h (en metros), viene dada con suma precisión por la fórmula de Helmert

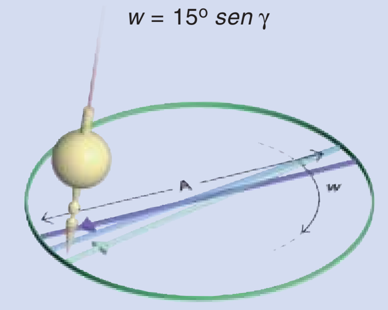
$$g = 9{,}80612 - 2{,}5865 \cdot 10^{-2} \cos 2\gamma + 5{,}8 \cdot 10^{-5} \cos^2 2\gamma - 3{,}08 \cdot 10^{-6} \cdot h.$$

La expresión que define la rotación de la línea de los ápsides (en grados por hora sidérea)

$$w = 15^{o}\,[1 - {}^{3}/_{8}\,(A/L)^2]\,sen\,\gamma$$

se simplifica, a grandes longitudes y amplitudes reducidas, en

$$w = 15^{o}\,sen\,\gamma$$



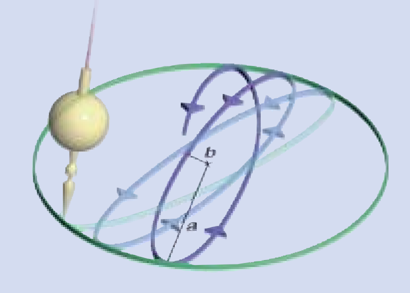
MAXIMA SIMETRIA. El mecanismo de oscilación debe contar con la máxima simetría posible. Si los ejes de la suspensión no se encuentran exactamente en el mismo plano, la longitud efectiva del péndulo varía a medida que rota la línea de los ápsides. Ello altera el período a razón de

$$\Delta p/p = ½\,\Delta L/L.$$

Además, la asimetría introduce, en cada oscilación, una precesión (ϕ) que perturba el movimiento del péndulo según

$$\Delta\phi = 3\pi ab/4L^2$$

donde a corresponde al semieje mayor de la elipse y b al semieje menor de la elipse.



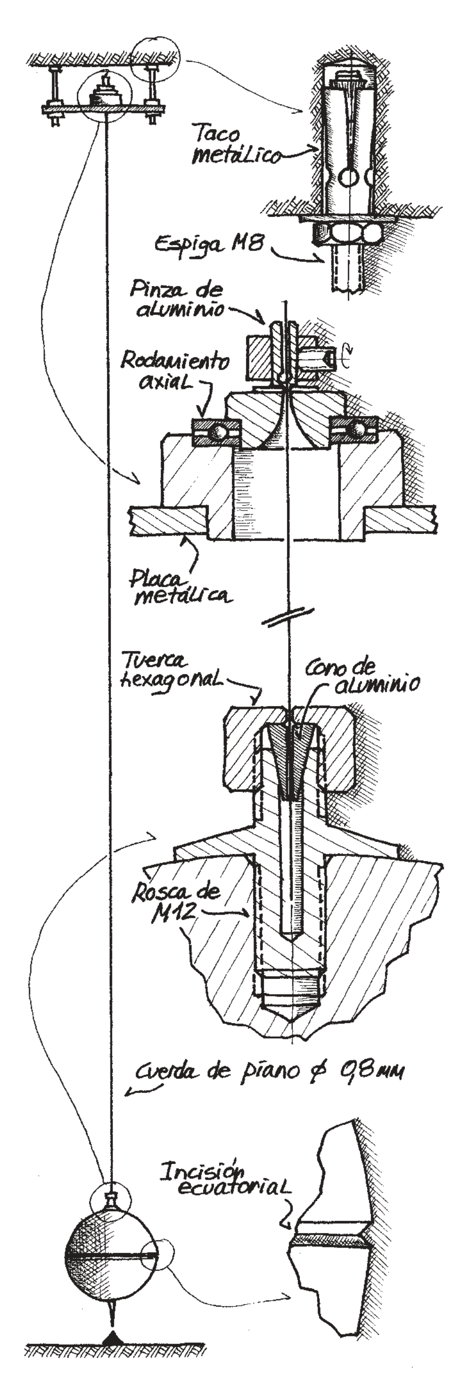
latitudes intermedias, el movimiento del péndulo resulta de una combinación de ambos escenarios.

Una vez a punto los componentes del péndulo, procederemos a instalarlos. Lo habitual es fijar en el techo una placa circular de acero o aluminio mediante seis espigas roscadas en tacos metálicos de expansión. Sobre la placa colocaremos un rodamiento axial y en éste la pinza que fija el cable. Procederemos luego a fijar la esfera, que previamente habremos colocado en un soporte que la sitúe a su altura definitiva. Para ello tiraremos el cable desde arriba hasta dejarlo tenso. Por fin, retiraremos el soporte de la esfera.

Para verificar el desplazamiento relativo entre el péndulo y nuestro planeta debemos utilizar métodos que introduzcan pocas perturbaciones. Foucault empleó un estilete fijado a la esfera que rozaba en dos montoncitos de arena situados en puntos opuestos respecto del punto central y en el extremo del recorrido del péndulo [*véase* "Léon Foucault", por William Tobin, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1998]. Otro método, similar, consiste en utilizar papel ennegrecido con humo, que queda marcado por un fino hilo de nailon fijado bajo la esfera.

Para poner en marcha el péndulo repetiremos el método original. Pondremos un lazo de hilo de algodón en el ecuador marcado en la esfera; tiraremos de éste con suavidad y, una vez apartado suficientemente de la vertical, lo fijaremos a un punto sólido y estable. Se recomienda dejar reposar la esfera en esta posición durante algunas horas, hasta que permanezca inmóvil. Por fin, quemaremos el nudo del hilo para que el péndulo inicie, con perturbaciones mínimas, su oscilación. Quizá resulte necesario repetir el lanzamiento, porque, pese a todas las precauciones, podríamos haber introducido algún movimiento espurio.

Poco a poco, el péndulo pierde energía por fricción con el aire, torsión, flexión, estiramiento del hilo y otras perturbaciones; por tanto, debe reimpulsarse pasadas unas cuantas horas. En el Panteón de París, Foucault impulsaba suavemente la esfera cada 3 o 4 horas. En nuestro experimento, la frecuencia dependerá de la longitud del péndulo y de la masa de la esfera. Esta operación puede introducir nuevas perturbaciones.



Se observó entonces que un mecanismo automático para el movimiento del péndulo facilitaría la observación. En la actualidad, podemos recurrir a varios métodos; el habitual consiste en un electroimán anular que atrae una masa de hierro o un imán permanente fijado al hilo.

Newton

Matemática y experimentum crucis

EXPERIMENTAL PHILOSOPHY AND THE BIRTH OF EMPIRICAL SCIENCE. BOYLE, LOCKE, AND NEWTON, por Michael Ben-Chaim. Ashgate; Aldershot, 2004.

NEWTON ON MATHEMATICS AND SPIRITUAL PURITY, por Ayval Leshem. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 2003.

THE ALCHEMY READER. FROM HERMES TRISMEGISTUS TO ISAAC NEWTON. Dirigido por Stanton J. Linden. Cambridge University Press; Cambridge, 2003.

FROM NEWTON TO HAWKING. A HISTORY OF CAMBRIDGE UNIVERSITY'S LUCASIAN PROFESSORS OF MATHEMATICS. Dirigido por Kevin C. Knox y Richard Noakes. Cambridge University Press; Cambridge, 2003.

VON NEWTON ZU HALLER. STUDIEN ZUM NATURBEGRIFF ZWISCHEN EMPIRISMUS UND DEDUKTIVER METHODE IN DER SCHWEIZER FRÜHAUFKLÄRUNG, por Simone De Angelis. Max Niemeyer Verlag; Tübingen, 2003.

No entenderemos al Newton del teorema del binomio, del descubrimiento de las leyes fundamentales de la dinámica, y la óptica, de la creación del cálculo, si hacemos abstracción del lecho rocoso sobre el que se basa. Sobre su método, experimental y matemático a un tiempo (*Experimental Philosophy and the Birth of Empirical Science*; *Newton on Mathematics and Spiritual Purity*): sobre un concepto unitario de la naturaleza (*The Alchemy Reader*). No entenderemos su alcance, si se nos escapa la retroalimentación expansiva de la ciencia heredada (*From Newton to Hawking*; *Von Newton zu Haller*). Discrepan, sin embargo, los autores en torno a su filosofía experimental, una expresión que hizo fortuna en la Inglaterra de la Restauración. Para unos constituyó el motor de su creación intelectual. Para otros, no la aceptó hasta 1712 y sólo en su equivalencia a ciencia empírica. Fía en la matemática su convencimiento de ser llamado por Dios para restablecer el conocimiento genuino de la realidad, desde hacía tiempo corrompido. A través de la matemática, la verdad, doquiera se hallara, volvería a resplandecer con su obra.

Isaac Newton (1642-1727) inició su formación en el Trinity College de Cambridge, cuyo umbral franqueó en 1661. Bajo la supervisión directa de Benjamin Pulleyn, se familiarizó con la cosmovisión aristotélica, enseñada en las aulas cantabrigenses. La asistencia a las clases de matemáticas de Isaac Barrow y, sobre todo, su inquietud por las nuevas corrientes que representaban Robert Boyle y René Descartes le hicieron cuestionarse no sólo las tesis hilemórficas, sino también el mecanicismo a ultranza de los contemporáneos.

Sabemos de esas perplejidades por su cuaderno de apuntes (*Quaestiones quaedam philosophicae*), donde iba anotando comentarios y objeciones de cuanto iba leyendo a propósito de cualquier cuestión de interés: movimiento perpetuo, cometas, corrupción, condensación, existencia de átomos, naturaleza del alma, gravedad (pesantez), cualidades de los cuerpos (raridad y fluidez), magnetismo, filosofía, materia, meteoros, minerales, constitución y percepción de la luz y el color. Había en esa libreta enciclopédica un ensayo extenso titulado "De los colores", inspirado en *Experiments and Considerations Touching Colours*, recién impreso (corría el año 1664). Su autor, Boyle, recogía la tesis aceptada en el siglo XVII, según la cual los colores constituían sensaciones, modificaciones, por reflexión o refracción, de la luz ordinaria. Newton se aprestó a comprobarlo.

Provocó el paso de un haz de luz a través de un prisma, que proyectaba su espectro sobre la pared. No encontró el círculo de colores que pronosticaba la teoría común, sino una figura oblonga de luz en el que los rayos azules experimentaban una refracción mayor que los rojos. Ese primer apunte sobre la refracción desigual no era, sin embargo, original suyo. Varios autores habían hablado, antes de que él entrara en Cambridge, de colores e índices de refracción. Sin embargo, la conciencia plena del hallazgo de Newton llegó dos años más tarde, cuando se afanaba en corregir las aberraciones mediante espejos mejor pulidos. Tras numerosos ensayos, incluido el célebre *experimentum crucis,* llegó a la conclusión de que la luz constituía una mezcla heterogénea de rayos con refracción dispar. En breve, la luz blanca se hallaba compuesta de rayos primarios, básicos, cada uno de los cuales tenía su propio e inalterable índice de refracción. Resume su labor en una carta que remitió en 1672 al secretario de la Regia Sociedad y que supuso el golpe de gracia contra la teoría admitida.

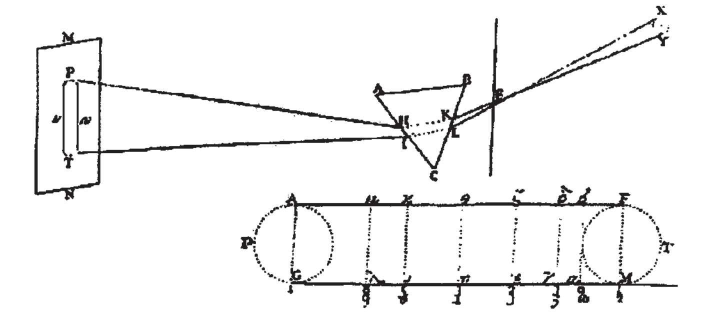
El guión de esas investigaciones y de otras que alumbraron la ciencia de su tiempo se gestó en su retiro de Woolsthorpe, donde se había refugiado huyendo de la peste en el verano de 1665. Al período allí transcurrido lo denominó él mismo su *annus mirabilis*. Lo fue por la ley de la acción y reacción: en un impacto, pensó, la cantidad de

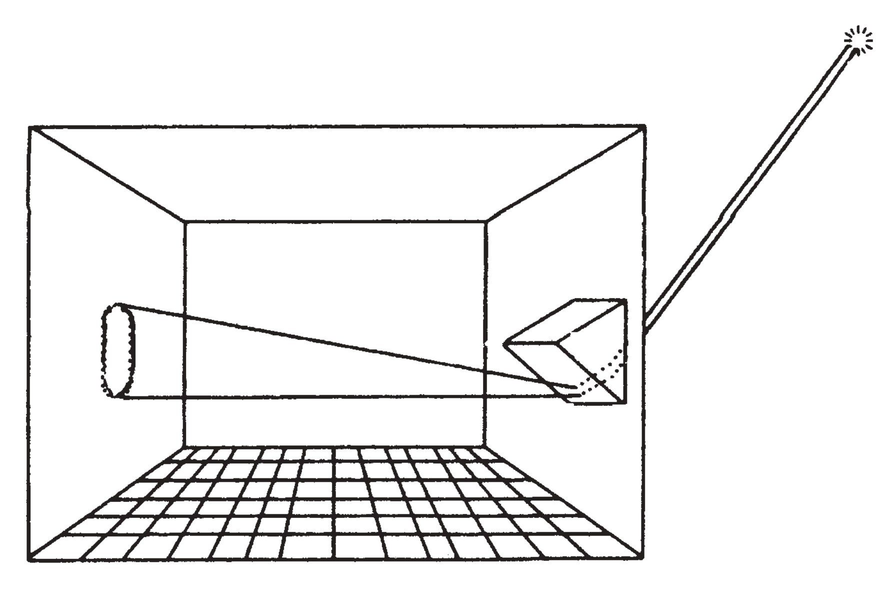
fuerza requerida para generar movimiento en el cuerpo debía ser equivalente a la cantidad de fuerza necesitada para destruir el movimiento. Lo fue para su aproximación al movimiento de la Luna, que daría origen a la ley de la gravitación. En Woolsthorpe se dedicó también a completar la labor matemática de Descartes y John Wallis sobre tangentes y series infinitas. A comienzos de 1666, había avanzado en integración y diferenciación. En octubre del mismo año esbozaba en un tratado sus propios progresos, incluidos la determinación de los máximos y mínimos y la expresión del teorema del binomio.

De vuelta a Cambridge, en 1667 fue elegido miembro del claustro del Trinity. Dos años después, sucede a Isaac Barrow en la cátedra lucasiana, instituida por Henry Lucas, que había estudiado en el St John's College, y destinada a convertirse en una de las instituciones académicas más acreditadas del mundo. Desde su fundación en 1663, la cátedra ha sido ocupada por un cuadro de honor singular de 17 figuras de la ciencia y la técnica: Barrow, Newton, William Whiston, Nicholas Saunderson, John Colson, Edward Waring, Isaac Milner, Robert Woodhouse, Thomas Turton, George Airy, Charles Babbage, Joshua King, Georg Gabriel Stokes, Joseph Larmor, Paul A. Dirac, M. James Lighthill y Stephen Hawking. Resulta inconcebible nuestro mundo sin sus aportaciones. Newton aparte, Babbage fue el progenitor del computador, Dirac anudó la mecánica cuántica y relatividad especial y Hawking nos ha enseñado vías posibles del origen y el destino del universo. Tenemos, además, la "prueba de Barrow" del teorema fundamental del cálculo, el tablero de Saunderson (un instrumento de cálculo para la visión dañada), el teorema de Waring sobre los enteros, el criterio de Airy sobre el poder de resolución telescópica, la ley de Stokes sobre la resistencia de los fluidos, la frecuencia de Larmor en la precesión atómica de un campo magnético y la cuarta ley de Lighthill del ruido del motor.

Newton desempeñó la cátedra durante 30 años (1669-1701). Los estatutos exigían que el profesor diera al menos diez lecciones, escritas con claridad y depositadas en el registro; en la biblioteca universitaria de Cambridge se conservan notas originales de sus clases. Dedicó sus primeros años a la óptica de refracción; desde 1673 extendió la docencia al álgebra y temas afines. Pese a declarar que él no fingía hipótesis con las disputas ociosas que levantaban, se vio envuelto en numerosas controversias entre 1669 y 1676. Por esas mismas fechas realizaría su primera incursión en los fenómenos eléctricos. No tardaría en asociar fuerza gravitatoria y fenómenos eléctricos y magnéticos; para Newton, el universo podía expresarse en un sistema compuesto de partículas y fuerzas. La gravitación universal constituía una fuerza que operaba a distancia.

En 1679 inició su relación con Hooke. En la correspondencia mantenida evidencia su interés por la dinámica, al tiempo que resuelve el problema del movimiento elíptico de los planetas identificado por Kepler. Así, cuando Edmund Halley acudió a Newton en 1684 para preguntarle qué curva resultaría de una ley de fuerzas del cuadrado inverso, el lucasiano le respondió que una elipse, pues ya lo había calculado, aunque no pudo en ese momento dar con el borrador de su demostración. Transcurrido un corto tiempo, Halley recibió un tratadito, *De Motu Corporum in Gyrum*; se indicaba allí que una órbita elíptica comportaba una ley de fuerza del cuadrado inverso. Newton se esforzaba ahora por ligar su análisis con un punto de vista más preciso de los movimientos reales de los planetas y sus satélites. Terminó los *Principia* en 1687. Introducía aquí su nuevo

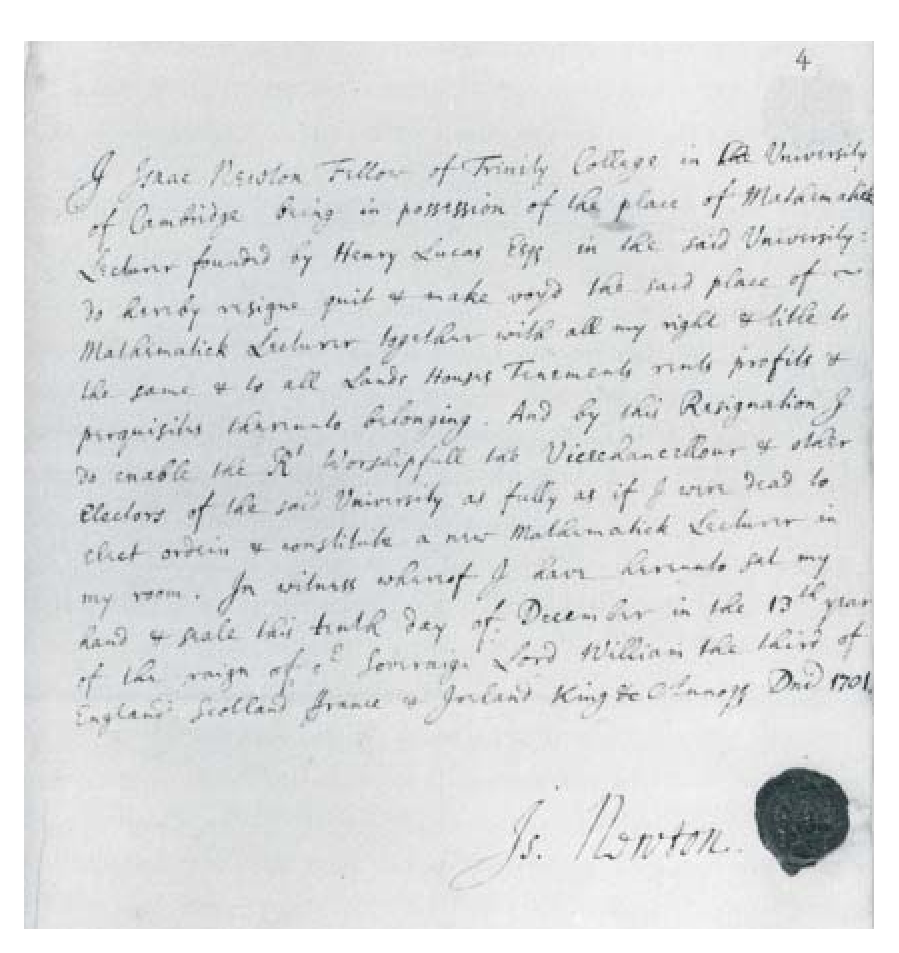




1. Reconstrucción de la forma oblonga del espectro.

concepto de masa y el principio de inercia, así como sus tres famosas leyes del movimiento, que aparecen en los manuales y son fundamento de la nueva ciencia de la mecánica racional.

Newton compartió otros muchos intereses de sus contemporáneos: filosofía, teología y alquimia. En cada una mostró su profundo conocimiento del estado de la disciplina y aportó su propia reflexión y experimentación. Ya en torno a 1666 se entregó a la lectura del *Origine of Formes and Qualityes*, de Boyle, De ese libro de química y de otras obras y autores tomó sus primeras notas y se embarcó en sus propios experimentos. De hecho, se dedicó intensamente a la alquimia con la construcción de su propio horno y adquisición de instrumental y sustancias. Newton creía que la alquimia escondía un camino hacia una verdad superior y tomó notas de libros que describían la alquimia como una búsqueda religiosa. R. S. Westfall y B. J. Dobbs han sostenido que el concepto alquímico de atracción ejerció una influencia determinante en el descubrimiento newtoniano de la gravitación universal. Tras la publicación de los *Principia*, sobre todo, el cultivo de la matemática dejó paso a la lucubración teológica (se decantó al parecer por el arrianismo) y la experimentación alquímica. A raíz de una profunda depresión sufrida en 1692, movió todos los resortes para asentarse en Londres; cuatro años después fue nombrado guardián del Sello y, en 1701, renunció a la cátedra lucasiana. Aún quedaba en el tintero su segundo tratado imponente, la *Opticks* (1704), una exposición sistemática y coherente del comportamiento de la luz. Fundado en su propio trabajo experimental, propuso una teoría corpuscular de la luz, si bien añadió ideas de la periodicidad. En las cuestiones ("Queries") abogaba por la existencia de fuerzas ejercidas a corta distancia para explicar el fenómeno de la iluminación. Alérgico a toda polémica, gastó parte de los veinte últimos años de su vida entre la presidencia de la Regia Sociedad y disputas sobre la prioridad de sus descubrimientos científicos con Flamsteed y Leibniz. Murió en 1727.


4

I Isaac Newton Fellow of Trinity College in the University of Cambridge being in possession of the place of Mathematick Lecturer founded by Henry Lucas Esq in the said University: Do hereby resigne quit & make void the said place of Mathematick Lecturer together with all my right & title to the same & to all Lands Houses Tenements rents profits & perquisites thereunto belonging. And by this Resignation I do enable the Rt Worshipfull the Vicechancellour & other Electors of the said University as fully as if I were dead to elect ordein & constitute a new Mathematick Lecturer in my room. In witness whereof I have hereunto set my hand & seale this tenth day of December in the 13th year of the reign of our Soveraign Lord William the third of England Scotland France & Ireland King &c Annoq Dni 1701.

Is. Newton.

2. Renuncia de Newton de su cátedra lucasiana.

Archisabida su influencia determinante en el cálculo y en física, se desconoce por la mayoría la prolongación del sello de Newton en biología. Su máximo representante ilustrado fue Albrecht von Haller (1708-1777). Le precedió una primera hornada de fisiólogos que se identificó con el Newton de los *Principia*, en particular, en la defensa de fuerzas de atracción. Archibald Pitcairne, David Gregory y otros partían de una concepción atomista de la materia y de las fuerzas de atracción para explicar los fenómenos fisiológicos. Su iatromecanicismo excesivo instó la aparición de un segundo movimiento, encabezado por Hermann Boerhaave, profesor de Leyden, introductor de Newton en Holanda que puso particular énfasis en la experimentación. Haller, alumno de 'sGravesande y Boerhaave, los dos máximos exponentes del newtonismo continental, sostenía que el naturalista debía explicar cómo procedían en el organismo animal la sensación, el movimiento, la digestión, el desarrollo y la reproducción.

Su propósito era crear una mecánica animal distinta, en la cual las leyes que gobiernan la fisiología operasen de la misma manera que las leyes físicas, aun cuando no fueran las mismas leyes. Por tanto, en los organismos podrían operar fuerzas que no se hallan fuera. Haller es conocido por demostrar la existencia de tal fuerza, la irritabilidad. Realizó una serie de experimentos en perros y otros animales, en lo que expuso distintas partes del cuerpo vivo del animal y lo irritaba con el contacto o con aplicación de sustancias químicas. Observó que los músculos reaccionaban mediante la contracción, demostrando así que poseían irritabilidad. Haller separaba la sensación de la irritabilidad, aduciendo que los nervios poseen "sensibilidad" y, por tanto, capacidad para transmitir sensaciones al cerebro.

—LUIS ALONSO

Werner Gans

LAS VELAS Y LA CORONA DE ADVIENTO

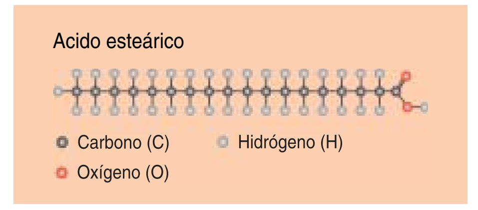
Es posible que las lámparas de diseño, los anuncios halógenos o los tubos de neón hagan de la noche el día, pero casi ninguna fuente de luz proporciona la sensación de bienestar de la vela. Su cálida luz personifica además en muchas religiones lo divino, lo místico, la esperanza, la victoria del bien. Así, ir encendiendo a lo largo de diciembre las cuatro velas de la corona de Adviento es en Alemania y en otros lugares un apreciado ritual.

Una vela encendida parece llena de misterio, pero su composición material no tiene nada de desconocido. El cuerpo, el combustible, es de parafina, cera o estearina, y lo atraviesa un hilo de algodón impregnado de cera, la mecha. Todos esos materiales se componen de largas cadenas de hidrocarburos. A la temperatura ambiente son sólidos; sólo al encender la mecha se derriten. La llama fracciona las cadenas en otras más cortas, gaseosas y mucho más ágiles que la sustancia original. Sus átomos de hidrógeno reaccionan con el oxígeno del aire del entorno: se produce agua en la llama. Mientras, se va liberando mucha energía; la temperatura de la llama sube casi hasta los mil grados. Los átomos de carbono del combustible forman entonces partículas de hollín, que se encienden de un vivo amarillo y, finalmente, se queman con el oxígeno del aire para dar dióxido de carbono. La capilaridad de la mecha proporciona sin cesar combustible líquido.

Junto a las antorchas de pino, las velas fueron durante mucho tiempo la única fuente de luz artificial. En tiempos de Lutero se quemaron en la iglesia del palacio de Wittenberg durante un año 35.750 libras en velas. Hasta entrado el siglo XIX, se hacían de sebo o cera. La grasa del ganado vacuno era la sustancia preferida; la cera de abeja o vegetal, muy cara, sólo estaba al alcance de la nobleza y la Iglesia. Se usaba también cetina, una grasienta masa blanca del seno frontal del cráneo del cachalote; pero esas velas se consumían enseguida.

En el año 1825, el químico francés Michel Eugène Chevreul (1786-1889) produjo estearina a partir de grasa. Casi al mismo tiempo se separó la parafina del petróleo. La parafina se compone de hidrocarburos de cadena larga; el ácido graso estearina se diferencia en que lleva además un grupo ácido al final de la molécula. Estas materias, puras y, fabricadas en grandes cantidades, más baratas, fundamentaron una industria cerera, en auge hasta que la lámpara de incandescencia empezó su marcha triunfal.

Las velas de cera de abeja gozan de gran popularidad. El combustible es un producto natural que las abejas obreras producen a partir de azúcar. La cera de abeja contiene junto a los componentes típicos de la cera, como la parafina, más de cincuenta componentes aromáticos, que le proporcionan su característico olor a miel.



1. LAS MOLECULAS del combustible, sea cera, estearina (mezcla de ácido esteárico y ácido palmítico) o parafina, consisten en largas cadenas de átomos de hidrógeno y carbono.



THOMAS BRAUN/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

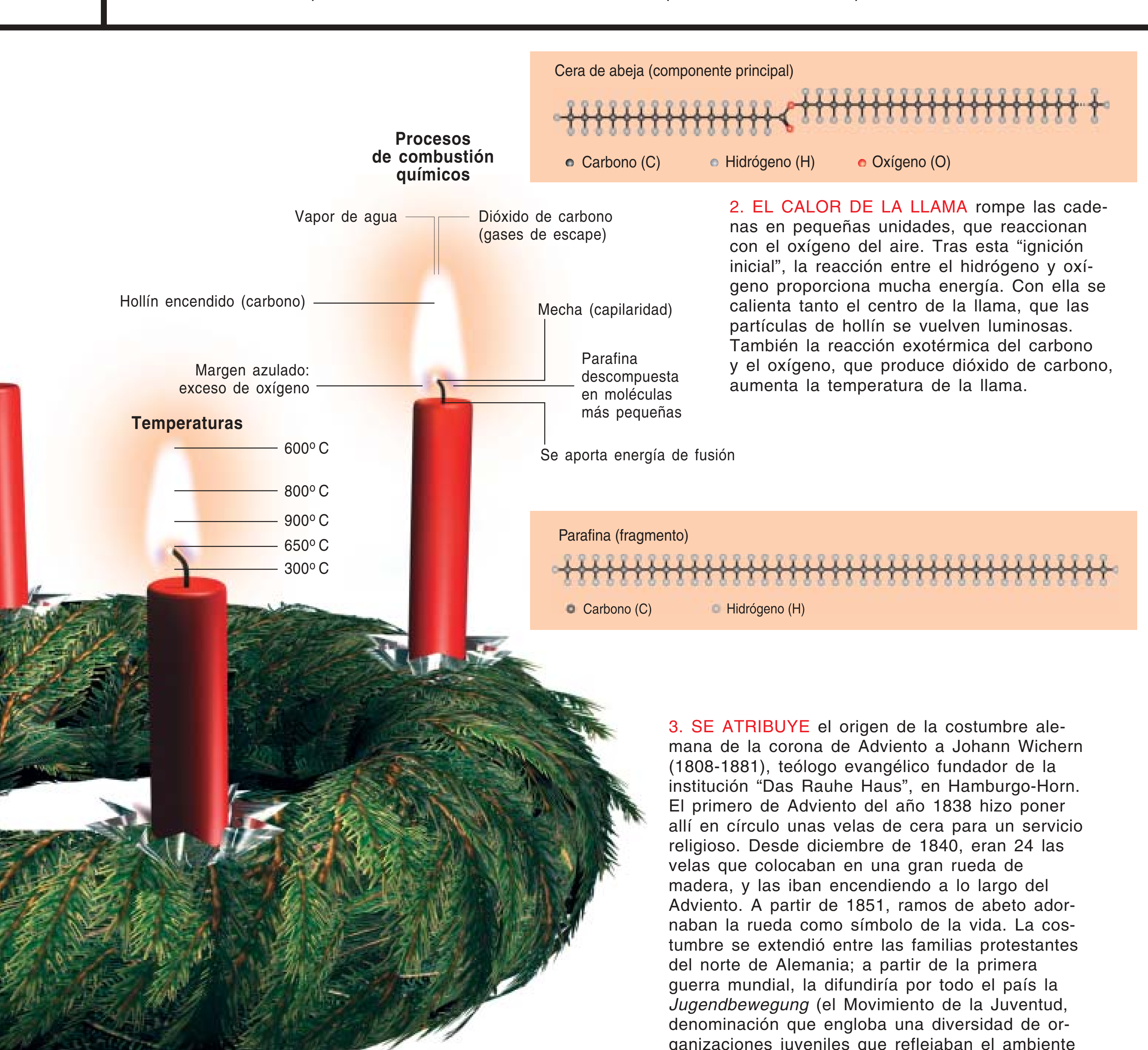
¿SABIA USTED QUE...?

➤ **UNA VELA** también encierra el peligro de incendio. A finales del siglo XX se dio un paso hacia una mayor seguridad: la impregnación del extremo inferior de la mecha suprime allí la capilaridad, con lo que una vela segura se apaga por sí sola.

➤ **LAS VELAS** se fabrican vertiendo en un molde, presionando un polvo o granulado, o mediante repetidas inmersiones de la mecha en cera líquida.

➤ **LA GRAVEDAD** se encarga de que los gases calientes suban. Hará unos seis años, se encendió una vela en una nave espacial. En la Tierra sólo habría ardido durante diez minutos. En la ingravidez, duró 45: los gases de combustión ascendían más despacio. La temperatura de la llama fue tan baja, debido al menor suministro de aire, que casi ninguna partícula de hollín se encendió; la llama fue por eso azul y, a falta de gravedad, redonda como una bola.

➤ **LA INTENSIDAD** de una fuente luminosa se mide en candelas. Originariamente, la candela se definió en Inglaterra como la intensidad de una vela que en una hora consumía 7,77 g de cetina. Hoy en día la definición se basa en la radiación de un cuerpo negro a la temperatura de fusión del platino.



2. EL CALOR DE LA LLAMA rompe las cadenas en pequeñas unidades, que reaccionan con el oxígeno del aire. Tras esta “ignición inicial”, la reacción entre el hidrógeno y oxígeno proporciona mucha energía. Con ella se calienta tanto el centro de la llama, que las partículas de hollín se vuelven luminosas. También la reacción exotérmica del carbono y el oxígeno, que produce dióxido de carbono, aumenta la temperatura de la llama.

3. SE ATRIBUYE el origen de la costumbre alemana de la corona de Adviento a Johann Wichern (1808-1881), teólogo evangélico fundador de la institución “Das Rauhe Haus”, en Hamburgo-Horn. El primero de Adviento del año 1838 hizo poner allí en círculo unas velas de cera para un servicio religioso. Desde diciembre de 1840, eran 24 las velas que colocaban en una gran rueda de madera, y las iban encendiendo a lo largo del Adviento. A partir de 1851, ramos de abeto adornaban la rueda como símbolo de la vida. La costumbre se extendió entre las familias protestantes del norte de Alemania; a partir de la primera guerra mundial, la difundiría por todo el país la *Jugendbewegung* (el Movimiento de la Juventud, denominación que engloba una diversidad de organizaciones juveniles que reflejaban el ambiente espiritual de Alemania en aquellos años).

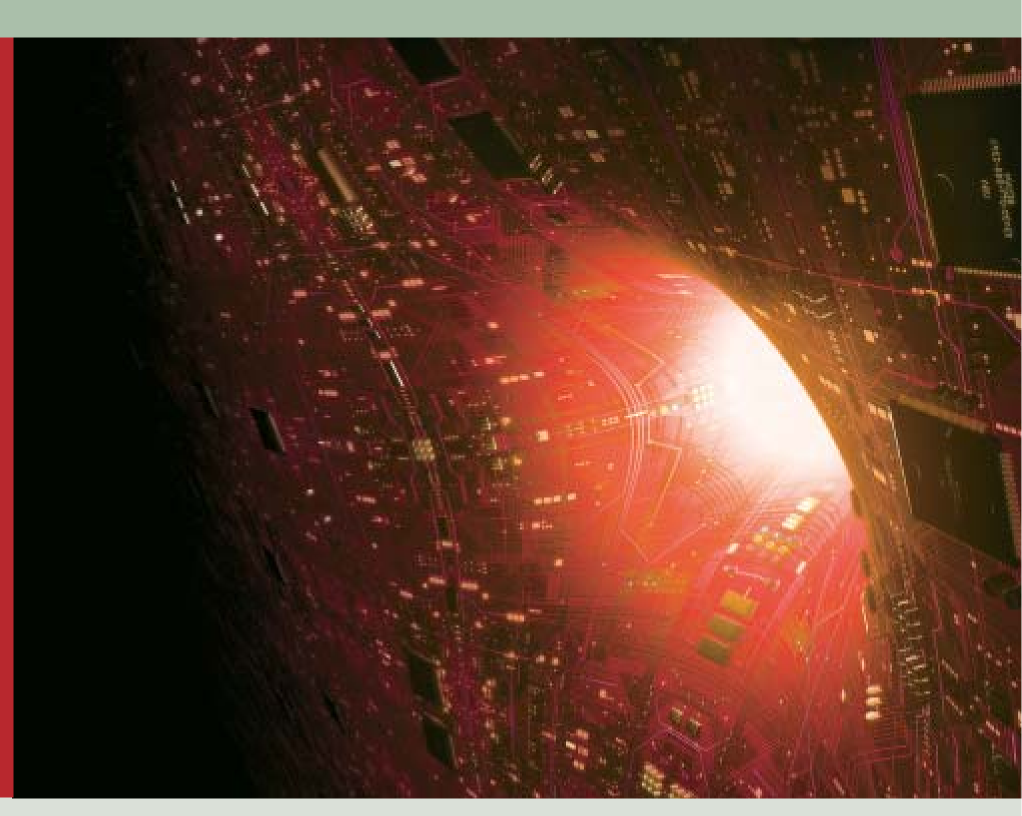
INDICE ANUAL

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 2004.*

MATERIAS

AUTORES





COMPUTACION EN AGUJEROS NEGROS, por Seth Lloyd y Y. Jack Ng

Conforme al espíritu de nuestro tiempo, las leyes de la física se transforman en programas informáticos, y el universo, en un ordenador.

LA MUSICA Y EL CEREBRO, por Norman M. Weinberger

¿Cuál es el secreto del extraordinario poder de la música? En busca de una respuesta, vamos desentrañando qué sucede en el cerebro de oyentes y músicos.



BRECHAS EN LA DEFENSA ANTIMISIL, por Richard L. Garwin

Es dudosa la eficacia del sistema defensivo antimisiles desplegado por los Estados Unidos.

EL ORIGEN DE LA MANO HUMANA, por David M. Alba, Salvador Moyà Solà y Meike Köhlner

El análisis estadístico de los restos de la mano de un hominino demuestra que las proporciones características de la mano humana no pudieron ser una adaptación ligada a la industria lítica.

LA RED COSMICA, por Robert A. Simcoe

Observaciones telescópicas y simulaciones informáticas del medio intergaláctico descubren las mayores estructuras del universo.

